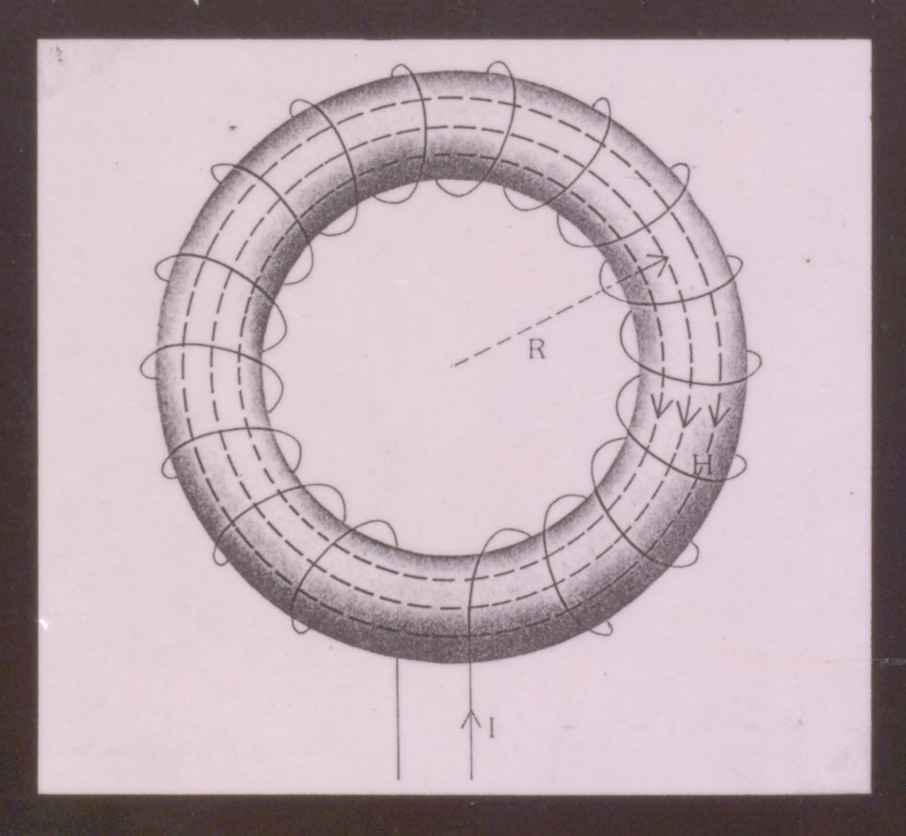
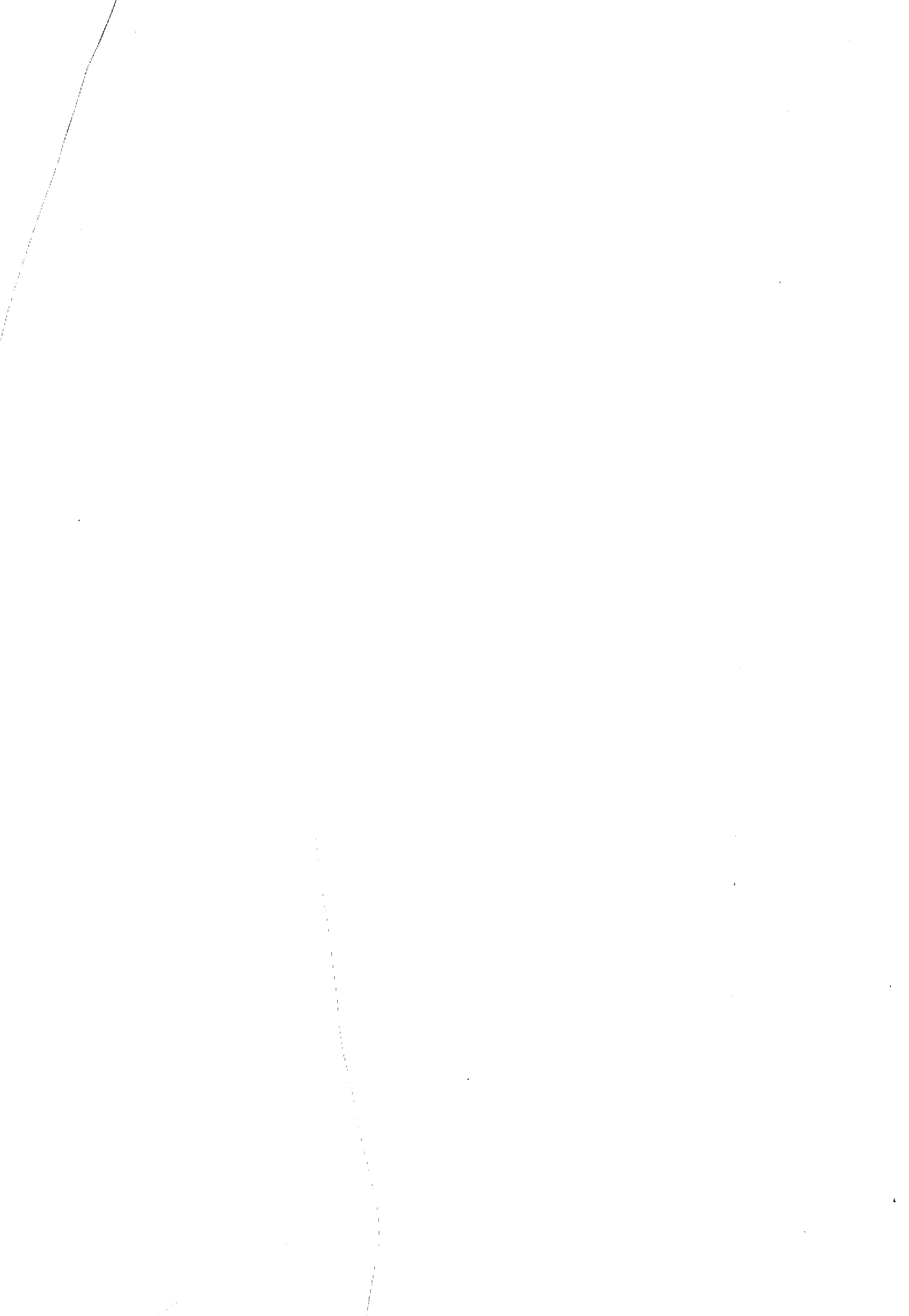
أسس الهندسه الكهربيه وتقنيتها

الدكتور علي رفعت حمدي
الدكتور عبد المنعم موسى



دار الراتب الجامعية



أسس الهندسه الكهربيه
وتقنيتها

دار الراتب الجامعية
ص.ب. ١٩٥٢٢٩ بيروت / لبنان
تلكس Rateb LE 43917

أسس الهندسه الكهربيه وتقنياتها

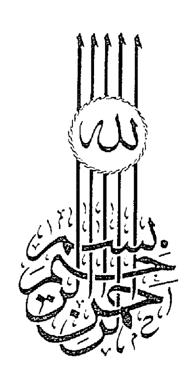
الدكتور علي رفعت حمدي

الدكتور عبد المنعم موسى

١٩٨٧



دار الراتب الجامعية



شركة منشورات :

دار الراتب الجامعية

سجل تجاري ٤٧١٨٤ / بيروت

الادارة : بناية اسكندراني رقم (٣) الطابق (٢) مقابل مسجد الجامعة

المكتبة : بيروت - بناية سعيد جعفر - تجاه جامعة بيروت العربية

ص . ب : ١٩٥٢٢٩ بيروت / لبنان

تلفون : ٣٠٦٥٠٥ - ٣١٧١٦٩ - ٣١٣٩٢٣ - ص . ب . ١٩٥٢٢٩

تلكس RATEB 43917 LE

كلمة الناشر

اعتمدنا منذ بدء عملنا في صناعة الكتاب اسلوب التخصص في المجالات الهندسية بفروعها والالكترونية والتقنية، ومواكبة أي تطور يطرأ عليها، حرصا منا على تغطية فراغ كبير في مكتبتنا العربية، وحتى لا نتشتت في مجالات العلوم الانسانية الواسعة والتي يغطي قسم كبير منها الزملاء الاكارم في لبنان والوطن العربي، وأيضا حتى لا نضيع في بحر العناوين الواسع، ويكون تخصصنا يغطي قسما هاما لم يأخذ حقه كاملا لهذا الوقت، وحتى يصبح للتقني والمهندس والمبرمج مكتبته العربية ومرجعه المناسب بلغته الحية.

لا ننكر ان المسيرة في هذا المجال العلمي شاقة وصعبة، خاصة في عدم جدواها من الناحية التجارية في كثير من الاحيان، لعدة اعتبارات عملانية معروفة لأغلب دور النشر حيث ان العمل فيها دقيق وشاق، وكميات طبعها ضئيلة قياسا بغيرها وهي بالتالي ليست مجزية نسبة لقلة عدد المتخصصين بمجالاتها، أو بالنسبة للفترة الزمنية الطويلة التي توزع بها!..

لكننا وبتشجيع ملموس من الهيئات العلمية والجامعات العربية، والمهندس التقني العربي، مستمرون في العطاء والمثابرة لتقديم كل جديد ومفيد.

نتقدم بالشكر العميق لكل مساهم بالتعاون معنا، ونخص بالذكر أعمدة الاساس في مؤسستنا، العمداء ورؤساء الأقسام والاساتذة والدكاترة المؤلفين والمدرسين في كلية الهندسة بفروعها في جامعة بيروت العربية، لهم منا أسمى آيات الشكر والامتنان، ونخص بالذكر المرحوم استاذنا الكبير عباس بيه بيومي واصدقائه الاوفياء، والذين كان لهم الفضل الكبير علينا في ما وصلنا اليه من نجاح وتفوق.

آملين من كل من يقرأ افتتاحيتنا قراءة الفاتحة عن روحه الطاهرة.

والله ولي التوفيق

راتب أحمد قبيعة

بيروت في ٥/ ٥/ ١٩٨٧

المقدمة

يتناول هذا الكتاب أهم الموضوعات المتعلقة بأساسيات التكنولوجيا الكهربية . ويمكن أن يكون مفيداً للطلاب الدارسين لأساسيات التكنولوجيا الكهربية على مستوى الدراسة الجامعية . كما يمكن أن يكون مرشداً للمهندسين غير الكهربيين فيما يختص بالنواحي الكهربية التي ترتبط بأعمالهم . وتُدرَّس محتويات الكتاب على مدى عام كامل لمدة ساعتين اسبوعياً لطلاب قسم الهندسة الكهربية بجامعتي الاسكندرية وبيروت العربية .

يقدم الباب الأول نبذة عن مصادر الطاقة في الطبيعة سواء التقليدية (الوقود ـ المصادر المائية ـ الطاقة النووية) أو غير التقليدية (طاقة الرياح ـ حرارة باطن الأرض ـ المد والجذر) .

يعطي الباب الثاني مراجعة سريعة لأساسيات الهندسة الكهربية والعلاقات المستخدمة في الدوائر الكهربية . كما يقدم شرحاً موجزاً للتيار المتردد وطرق حل دوائره وذلك بهدف المساعدة على تفهّم مادة الكتاب . كما توجد دراسة للنظام ثلاثي الأطوار وبيان موجز عن طرق توليد ونقل وتوزيع القدرة الكهربية . كل

هذا من خلال أمثلة توضيحية محلولة .

يتناول الباب الثالث نظم التمديدات الكهربية في المباني . فيقدم شرحاً لأنواع الكابلات الكهربية والمواسير التي تسحب داخلها تلك الكابلات . ثم يبين النظم والقواعد الواجب اتباعها في التمديدات الكهربية . كما يشرح أنواع لوحات التوزيع ودوائر التغذية الرئيسية والفرعية .

يختص الباب الرابع بطرق الحسابات الخاصة بمشروع للتمديدات الكهربية بمبنى . ويعطى جداول للقيم القياسية لأهم الأحمال الموجودة في المباني . كما يعطي شرحاً تفصيلياً لطريقة إختيار وتركيب وتوصيل لوحات التوزيع والمصهرات والمفاتيح والكابلات اللازمة للمشروع .

يتناول الباب الخامس موضوع الإضاءة الاصطناعية ، فيقدم شرحاً لطبيعة الضوء والكميات الضوئية المختلفة . ثم يبين شروط التصميمات الضوئية وطرق الحسابات المتعلقة بذلك مع أمثلة توضيحية محلولة . كما يعطي شرحاً لأنواع المصابيح المختلفة وخواص كل منها .

يهتم الباب السادس بموضوع البطاريات بأنواعها المختلفة ، ويشرح الطرق المختلفة لتجميع البطاريات مع التوضيح بأمثلة محلولة .

أُفرد الباب السابع للكهروستاتيكية . فقدم التعريفات والفروض الأساسية والنظريات المستعملة وطرق تطبيقها . كما شرح فكرة المجالات المحافظة وغير المحافظة والتأريض . ثم قدم دراسة للمكثفات وطرق الحسابات المتعلقة بها . وكذلك عملية الشحن والتفريغ بالإضافة إلى بعض الموضوعات الأخرى الهامة .

خُصِّص الباب الثامن لموضوعي المغناطيسية والكهرومغناطيسية . فيبدأ كما في الباب السابع بالتعريفات والفروض الأساسية والنظريات المستعملة . ثم ينتقل إلى الدوائر المغناطيسية ومنحنى المغنطة والتخلف المغناطيسي . كما يشرح بإسهاب فكرة الحث الكهرومغناطيسي ومعاملات الحث المختلفة وحساب التيار في الدوائر الحثية . هذا بالإضافة إلى بعض الموضوعات الأخرى المتعلقة بذلك . كل هذا من خلال العديد من الأمثلة المحلولة .

إننا نرجو الله سبحانه وتعالى أن نكون قد وُفِّقنا في عملنا هذا لخدمة الطلاب العرب في كل مكان .

وأخيراً فإننا نود أن نشكر دار الراتب الجامعية على المجهود الذي قامت به لإخراج هذا الكتاب على هذه الصورة الطيبة .

والله ولي التوفيق

المؤلفان

بيروت في آيار ـ مايو ـ ١٩٨٧



الفهرس

المفاهيم الأساسية للمغناطيسية ـ الفروض الأساسية ـ شدة المجال ـ شدة المغناطيسية ـ العلاقة بين النفاذية المطلقة والنفاذية النسبية .

أساسيات الكهرومغناطيسية ـ القوة على سلك حامل للتيار في مجال مغناطيسي ـ شدة المجال الناشىء عن تيار في سلك طويل مستقيم ـ شدة المجال داخل ملف طولي ـ القوة بين موصلين حاملين للتيار ـ أمثلة .

الدوائر المغناطيسية ـ الفيض المتسرب ـ منحنى المغنطة ـ أمثلة ـ الحث الكهرومغناطيسي ـ وسائل الحصول على قوة دافعة كهربية بالحث المغناطيسي ـ معامل الحث الذاتي ـ معامل الحث التبادلي ـ المحاثات على التوالي ـ المحاثات على التوازي ـ أمثلة .

التخلف المغناطيسي وقانون ستاينمتز ـ الطاقة المختزنة في المجال المغناطيسي ـ القوة بين قطبين مغناطيسيين ـ أمثلة ـ التيار في الدوائر الحثية ـ مثال .

بسم الله الرحمن الرحيم

الباب الأول

مصادر الطاقة في الطبيعة

١ ـ ١ مقدمة عن مصادر الطاقة :

توجد في الطبيعة مصادر مختلفة للطاقة منها أنواع استخدمت وطورت وأصبحت في صورة تجارية واقتصادية ويمكن تسميتها **المصادر التقليدية للطاقة ـ Conventional Sources of Energy** ، بينما توجد أنواع أخرى ما زالت تحت التطوير ولم تصل بعد إلى مستوى الاستخدامات الاقتصادية أو إلى الانتشار التجاري ويمكن تسميتها **المصادر غير التقليدية للطاقة ـ Non-Conventional Sources of Energy** وفيما يلي الأنواع الشائعة من كل من النوعين .

أولاً ـ أنواع الطاقة التقليدية :

(أ) طاقة الوقود — Fuel energy

(ب) طاقة المساقط المائية — Hydraulic energy

(جـ) الطاقة النووية — Nuclear energy

ثانياً ـ أنواع الطاقة غير التقليدية :

(د) الطاقة الشمسية — Solar energy

(هـ) طاقة الرياح — Wind energy
(و) طاقة حرارة باطن الأرض — Geothermal energy
(ز) طاقة المد والجذر — Tide energy

وفيما يلي نبذة عن كل من هذه الأنواع .

١ ـ ٢ المصادر التقليدية للطاقة :

(أ) طاقة الوقود :

يوجد الوقود في الطبيعة في ثلاث صور :

الوقود الجاف	الفحم بأنواعه
الوقود السائل	البترول (بنزين ، كيروسين ، سولار . . .)
الوقود الغازي	الغازات الطبيعية والصناعية

ويستخدم الوقود لتوليد الطاقة بطريقتين :

١ ـ حرق الوقود في صوره المختلفة للحصول على طاقة تستخدم مباشرة للتدفئة أو للأغراض الصناعية ، أو بعد تحويلها إلى طاقة ميكانيكية عن طريق استخدام الحرارة الناتجة عن حرق الوقود للحصول على بخار ماء بحرارة وضغط ثم استخدام هذا البخار لإدارة الآلات البخارية أو التوربينات البخارية وبذا تحول الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية دوارة .

٢ ـ الحصول على طاقة ميكانيكية من الوقود مباشرة باستخدام آلات الاحتراق الداخلي Internal Combustion Engines (I.C.E.) . ومنها الآلات التي تدار بالبنزين أو بالسولار مثل ماكينات الديزل التي أصبحت تنتج بقدرات عالية جداً جعلتها شائعة الاستعمال في أغراض مختلفة . ويستخدم الوقود في هذه الأحوال في صورته السائلة أو الغازية . وتستخدم الطاقة الميكانيكية الناتجة في صورتها أو بعد تحويلها إلى طاقة كهربية عن طريق

المولدات الكهربية بأنواعها . ويتميز الوقود بإمكان نقله من أماكن استخراجه إلى أماكن استخدامه مباشرة أو إلى أماكن مركزية يحول فيها إلى طاقة كهربية ثم يتم نقله إلى أماكن الاستخدام في صورة تيار كهربائي . وينتج عن استخدام الوقود تلوث شديد للبيئة مما يعتبر من عيوب استخدامه خاصة في داخل المدن .

(ب) طاقة المساقط المائية أو الطاقة الهيدروليكية :

يوجد هذا النوع من الطاقة في صورة مساقط مياه طبيعية أو اصطناعية وفي كلا الحالتين يوجد فرق في منسوب المياه ناتج عن انحدار نتيجة لتصرف المياه من خزان طبيعي أو اصطناعي بسبب الأمطار أو ذوبان الثلوج على الجبال مثلاً . ويستخدم فرق منسوب المياه هذا لإدارة التوربينات المائية بأنواعها المختلفة والتي تناسب فروق المناسيب للمياه في المسقط المائي ، وينتج عن ذلك طاقة ميكانيكية يمكن استخدامها مباشرة أو تحويلها إلى طاقة كهربية باستخدام المولدات الكهربية .

ويعتبر هذا النوع من الطاقة من أرخص المصادر وهو لا يسبب أي نوع من التلوث للبيئة ، ولكن من عيوبه ضرورة استخدامه في أماكن تواجد المساقط المائية مما يتطلب نقل الطاقة الناتجة من أماكن توليدها إلى أماكن استخدامها والتي تكون أحياناً نائية بعد تحويلها إلى طاقة كهربية ، مما يضيف تكاليف اضافية على سعر الطاقة المنتجة .

(جـ) الطاقة النووية :

ينتج هذا النوع من الطاقة نتيجة انشطار الذرة الذي ينتج عنه طاقة حرارية هائلة تستخدم للتسخين أو للحصول على طاقة حرارية تستخدم لتسخين المياه والحصول على بخار يمكن استخدامه في إدارة توربينات بخارية للحصول على طاقة ميكانيكية . ثم استخدام مولدات لتحويلها إلى طاقة

كهربية . وتتم هذه العملية في المفاعلات الذرية حيث تستخدم قضبان من معدن اليورانيوم المخصب ٢٣٥ ، ٢٣٨ تقصف بالنيوترونات فتنشطر ذرات اليورانيوم ويصحب ذلك انطلاق طاقة حرارية هائلة بالإضافة إلى نيوترونين من النيوترونات الحرة التي تسبب انشطار لـذرتين أخريين ينتج عن كل منهما نيوترونين أخرين وهكذا ويصحب كل انشطار طاقة حرارية . ولذا فإنه يجب التحكم في هذا **التسلسل الانشطاري** عن طريق امتصاص النيوترونات الحرة الزائدة الناتجة عن الانشطارات وترك العدد الكافي فقط للحصول على الطاقة الحرارية المطلوبة ، وهو ما يسمى بالتحكم في المفاعل . كما يمكن امتصاص كل النيوترونات الناتجة بالكامل عند الرغبة في إيقاف المفاعل تماماً عند اللزوم . ويسمى اليورانيوم المستخدم لتشغيل المفاعل **الوقود النووي** ، ويتطلب تصنيعه ومعالجته تكنولوجيا متقدمة جداً موجودة في دول معدودة . هذا علاوة على التكنولوجيا المعقدة المستخدمة في بناء المفاعلات من ناحية التشغيل والتحكم في الأداء ، والوقاية من أخطار الاشعاعات الذرية القاتلة التي تصدر نتيجة للانشطار وهي اشعاعات $\propto, \beta, \gamma$ والنيوترونات الحرة المنطلقة . وهذه الاشعاعات القاتلة يمكن ايقافها وتقليل اضرارها بواسطة حوائط وأغلفة من الخرسانة والرصاص المصمت . أما الهواء الموجود بداخل المفاعل وهو أيضاً ملوث بالاشعاعات الخطرة فيرسل إلى طبقات الجو العليا بواسطة مداخن مرتفعة فتنشره الرياح بهدف تخفيف أثره الضار على البيئة . ويعتبر كل ما هو بداخل المفاعل خطراً بسبب الإشعاعات التي تلوثه وتسمى هذه الأشياء التي يستغنى عنها من المفاعل **بالنفايات الذرية** التي قد تحتفظ بخطورتها مدد قد تصل إلى عشرات السنوات وتعتبر وسيلة التخلص من هذه النفايات الذرية مشكلة عالمية لم يوجد لها حل حتى الآن .

ورغم تسويق هذا النوع من الطاقة تجارياً على أنه نوع من الطاقة الرخيصة والغير مكلفة ، إلا أن ثمن المفاعل ما زال مرتفعاً جداً علاوة على الأخطار المصاحبة لاستخدامه واحتكار أعمال صناعته وصيانته وتشغيله ، مما

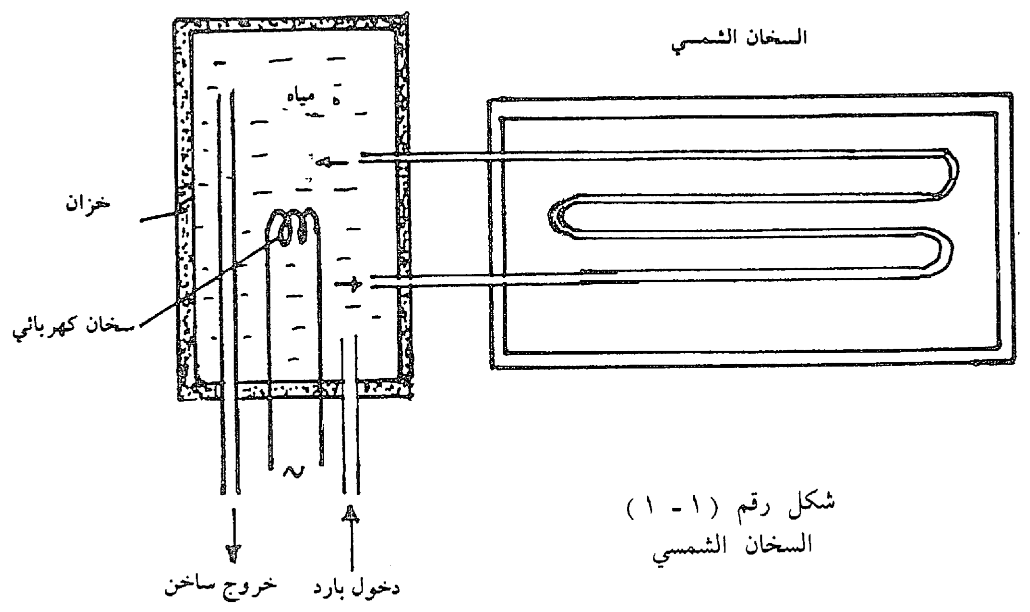
يحد من استخدام الطاقة النووية كمصدر من مصادر الطاقة .

١ - ٣ المصادر غير التقليدية للطاقة (المصادر المتجددة) :

(د) الطاقة الشمسية :

تستخدم الطاقة الشمسية اما في صورة الطاقة الحرارية أو الطاقة الضوئية للشمس .

وتستخدم الطاقة الحرارية للشمس عن طريق السخانات الشمسية شكل (١ - ١) .



شكل رقم (١ - ١)
السخان الشمسي

ويتكون السخان من أنبوب معرج يمر فيه الماء ويتعرض للشمس الساقطة عليه من خلال الغطاء الزجاجي للصندوق الذي يحتويه ، فتسخن المياه لدرجة ما . ويخزن الماء الساخن في خزان معزول حرارياً يقوم بتحريك المياه بداخل الأنبوب عن طريق الدوامات الحرارية . ويزود هذا الخزان بسخان كهربائي اضافي يعمل عند اللزوم للحصول باستمرار على ماء ساخن في الخزان خاصة في ساعات عدم وجود الشمس .

وتستخدم **الطاقة الضوئية للشمس** عن طريق **الخلايا الضوئية** . والخلية الضوئية عبارة عن لوح من مادة شبه موصلة لها خاصية انتاج جهداً كهربياً عند سقوط الضوء عليها ويسمى هذا الجهد **الجهد الكهروضوئي Photo Electric e.m.f.** وتسمى الطاقة المنتجة **الطاقة الكهروضوئية** وتستخدم خلايا من هذا النوع في مصفوفات على التوالي والتوازي للحصول على الجهد والتيار المطلوبين من مجموعة من هذه الخلايا . والجهد المنتج من هذه الخلايا صغير جداً (نصف ـ فولت من الخلية) وكذلك الطاقة المنتجة مما يتطلب عدداً كبيراً جداً منها مع ارتفاع ثمنها مما يحد من استعمالها على مستوى تجاري إلا في أغراض قليلة جداً مثل الساعات والحاسبات والألعاب الالكترونية ، وقد أنتجت أخيراً ترانزستورات ضوئية Photo Transistors تعطي نفس الخاصية في محاولة لتخفيض التكلفة .

(هـ) طاقة الرياح :

تستخدم الرياح في إدارة مراوح مرتفعة وكبيرة فتدور ريش المروحة محولة طاقة الرياح إلى طاقة ميكانيكية تستخدم لادارة طلمبات ماصة كابسة لرفع المياه في المناطق الصحراوية أو لإدارة مطاحن الغلال وتسمى **طواحين الهواء Wind Mills** . أو لإدارة مولدات لتوليد الكهرباء في الأماكن النائية مثل أبراج تقوية الموجات الميكروية Micro Wave .

والطاقة الناتجة عن المروحة يحددها حجم الريش ومدى اتزانها تحت ضغط الرياح مما يجعلها تصلح للاستخدام الفردي ويحد من استخدامها كمصدر تجاري للطاقة .

(و) طاقة حرارة باطن الأرض :

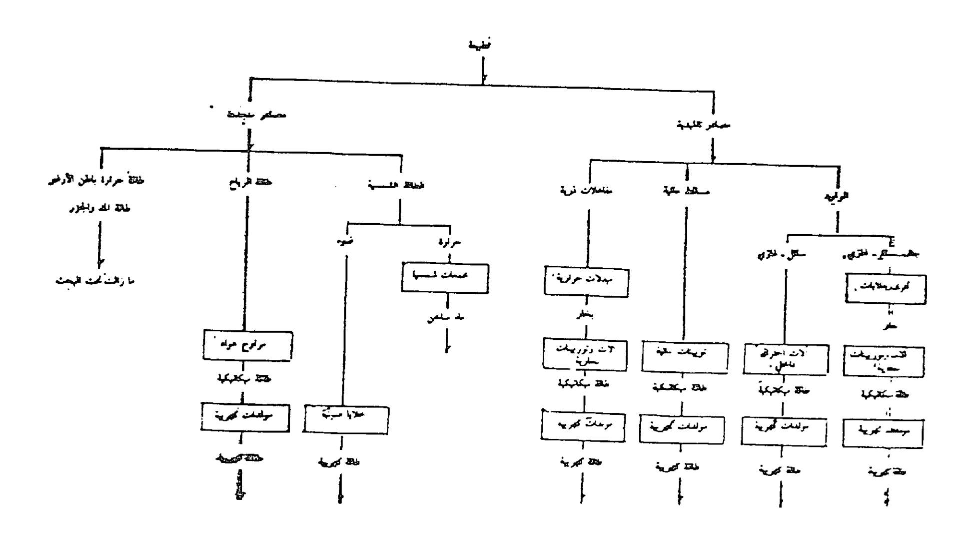
تستخدم في هذا النوع الحرارة الشديدة الموجودة في باطن الأرض للحصول على بخار ساخن لاستخدامه لأغراض التدفئة أو لإدارة توربينات

بخارية للحصول على طاقة ميكانيكية يمكن تحويلها عن طريق مولدات للحصول على طاقة كهربية .

(ز) طاقة المد والجزر :

يستخدم في هذا النوع الارتفاع والانخفاض الناتج عن المد والجزر أو حركة المياه أثناء المد والجزر في ادارة آلات لتحويل تلك الطاقة إلى طاقة ميكانيكية يمكن تحويلها عن طريق مولدات للحصول على طاقة كهربية .

وطاقة حرارة باطن الأرض وكذلك طاقة المد والجزر ما زالا في دور البحث والتطوير ولم يصلا حتى الآن إلى الاستخدام التجاري . ويبين الشكل رقم (١ ـ ٢) جدولاً يبين المصادر المختلفة للطاقة .



شكل (١ ـ ٢) جدول مصادر الطاقة



الباب الثاني

مقدمة في الهندسة الكهربية

٢ ـ ١ تمهيد :

ذكرنا في الباب الأول أن الطاقة بصورها المختلفة تحول إلى طاقة ميكانيكية ثم تستعمل المولدات الكهربية لتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربية . وتستخدم الطاقة الكهربية في صورة قدرة وبشكل تيار كهربائي يكون إما تياراً مستمراً أو تياراً متردداً وذلك على النحو التالي :

(أ) التيار المستمر (Direct Current) :

هو تيار ذو جهد ثابت القطبية يمكن الحصول عليه من البطاريات أو من مولدات التيار المستمر ويكون للتيار في هذه الحالة قطبان أحدهما موجب (+) والآخر سالب (−) .

(ب) التيار المتردد (Alternating Current) :

هو تيار ذو قطبية متغيرة بعدد من المرات في الثانية يسمى التردد (Frequency) . والتردد الشائع هو ٥٠ ذبذبة في الثانية (50 Cycles / sec or 50 Herz) ـ ويستعمل في الولايات المتحدة تردد ٦٠ ذبذبة (60 Hz) . ويمكن

الحصول على هذا النوع من التيار بواسطة مولدات التيار المتردد . وهذا النوع من التيار هو المعروف والمستخدم في المدن لجميع الأغراض .

٢ - ٢ بعض العلاقات المستخدمة لحساب التيار الكهربائي :

(أ) الجهد والتيار والمقاومة :

يتناسب التيار المار في مقاومة ثابتة تناسباً طردياً مع الجهد المسلط على المقاومة حسب قانون أوم «Ohm's Law» حيث :

$$I = \frac{V}{R} \text{ amp} \qquad (2.1)$$

فإذا سلط جهد قدره ٢٢٠ فولت على مقاومة قدرها ١٠٠ أوم فإنه يمر بالدائرة تيار قدره :

$$I = \frac{220}{100} = 2.2 \text{ amp}$$

وإذا مرر تيار قدره ١٠ أمبير في مقاومة مسلط عليها جهد قدره ٢٢٠ فولت فإن قيمة المقاومة يمكن حسابها كالآتي :

$$R = \frac{V}{I} = \frac{220}{10} = 22 \text{ ohm}$$

وإذا مرر تيار قدره ١٥ أمبير في مقاومة قيمتها ٢٠ أوم فإن الجهد على طرفي المقاومة يمكن حسابه كالآتي :

$$V = I.R = 15 \times 20 = 300 \text{ volt}$$

(ب) القدرة الكهربية **Electric Power** :

القدرة المستنفذة في دائرة كهربية وحدتها الوات Watt ومضاعفات الوات

1 Kilo Watt (KW) = 1000 Watt

1 Mega Watt (MW) = 1000000 Watt

والمكافىء الميكانيكي للقدرة هو الحصان Horse Power (HP) حيث :

$$1\ HP = 746\ Watt = 0.746\ KW \qquad (2.2)$$

ويمكن حساب القدرة (W) في حمل على النحو التالي :

نفرض أن الحمل مقاومة (R) مسلط عليها جهداً قدره (V) فولت .

فإن القدرة المستنفذة في المقاومة $= V \times I$

وحيث أن التيار المار في المقاومة $I = \frac{V}{R}$

فتكون القدرة المستنفذة (W) في المقاومة $= V \times \frac{V}{R} = \frac{V^2}{R}$ وات

فإذا كانت مكواة كهربية تعمل على جهد مقداره ١١٥ فولت وقدرتها ١٠٠٠ وات فإنه يمكن حساب التيار المار بالمكواة وكذلك مقاومتها على النحو التالي :

$$I = \frac{W}{V} = \frac{1000}{115} = 8.7\ amp$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{V^2}{W} = \frac{115 \times 115}{1000} = 13.225\ ohm$$

$$\text{or} \quad = \frac{W}{I} \cdot \frac{1}{I} = \frac{W}{I^2} = \frac{1000}{8.7 \times 8.7} = 13.225 \text{ ohm}$$

(جـ) الطاقة الكهربية Electrical Energy :

الطاقة المستنفذة في حمل وحدتها وات ساعة Watt hour ومضاعفاتها كيلوات ساعة Kilowatt hour (Kw.hr) أوميجاوات ساعة Megawatt Hour (Mw.hr) والكيلوات ساعة هي الوحدة المستخدمة للمحاسبة على استهلاك التيار الكهربائي في المدن . وهي عبارة عن الطاقة المستنفذة نتيجة لإمرار كيلوات واحد في حمل لمدة ساعة كاملة .

ويمكن حساب الطاقة المستنفذة في حمل يمر فيه تيار قدره (I) أمبير لمدة (t) ساعة على النحو التالي :

$$\text{Energy (E)} = \frac{w \times t}{1000} = \frac{V.I.t}{1000} \text{ Kw.hr} \qquad (2.3)$$

والمكافيء الحراري للطاقة هو الجول Joule حيث :

$$1 \text{ joule} = 1 \text{ watt sec.} \qquad (2.4)$$

$$1 \text{ calorie} = 4.2 \text{ joule} \qquad (2.5)$$

$$1 \text{ Kw.hr} = 3600 \times 10^3 \text{ joule}$$

$$= \frac{3600 \times 10^3}{4.2 \times 10^3} = 857.14 \text{ K.calorie}$$

ويبين الجدول رقم (٢ - ١) بعض الوحدات الهامة .

جدول (٢ - ١) بعض الوحدات والعلاقات الهامة

الكمية	الوحدة المطلقة	الوحدة -بالجاذبية	العلاقة بينهما
القوة Force	نيوتن (N)	وزن كيلوجرام Kg.wt	1 Kg.wt = 9.8N
الشغل والطاقة Work and Energy	الجول (J)	متر . وزن كيلوجرام m.Kg.wt	1 m Kg.wt = 9.8 J
		W.D.(J) = Torque (N.m) × θ (rad.)	
القدرة Power	الوات	Power (W) = Force (N) × velocity (m / s) Power (W) = Torque (Nm) × ω (rad / sec.)	1 watt = 1 joule / sec.
عزم الازدواج Torque	نيوتن متر (Nm)	وزن الكيلوجرام متر Kg.wt.m or Kg.m	1 Kg.m = 9.8 Nm

٢ ـ ٣ أمثلة محلولة :

مثال ٢ : ١

(أ) أوجد الطاقة الكهربية المستهلكة لرفع درجة حرارة ٤٥ لتر من الماء ٧٥ درجة مئوية . إذا كانت جودة السخان الكهربائي المستعمل ٩٠٪ .

(ب) لأي ارتفاع يمكن رفع وزن قدره ٥ طن باستخدام نفس الطاقة المستخدمة في (أ) إذا كانت الجودة في هذه الحالة ٧٠٪ .

(جـ) أوجد الزمن الذي يلزم لسخان كهربائي مقاومته ٥٠ أوم ويعمل على جهد قدره ٢٢٠ فولت لكي يستنفد نفس الطاقة في (أ) .

(أ) وزن ٤٥ لتر من الماء = ٤٥ كيلوجرام .

الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارتها ٧٥°م = m.c.t

= ٤٥ × ١ × ٧٥ = ٣٣٧٥ كيلوسعر

الحرارة الناتجة عن السخان = ٣٣٧٥ × $\frac{١}{٠,٩}$ = ٣٧٥٠ كيلوسعر

الطاقة الكهربية المطلوبة = ٣٧٥٠ × $\frac{١}{٨٥٧}$ = ٤,٣٨ كيلوات ساعة

(ب) الطاقة المتاحة

= ٣٧٥٠ × ٤٢٠٠ × ٠,٧ = ١١,٠٣ × ١٠^{٦} جول

= m.g.h = ٥٠٠٠ × ٩,٨ × h

الارتفاع (h) = ٢٢٥ متراً .

(جـ) الطاقة المتاحة = ٣٧٥٠ × ٤٢٠٠ جول

$$= t \times \frac{V^2}{R} = \frac{٢٢٠ \times ٢٢٠}{٥٠} \; t$$

الزمن اللازم (t) = ١٦٢٧٠ ثانية = ٤,٥ ساعة .

مثال ٢ : ٢

سخان كهربائي يرفع درجة حرارة ١٣,٦١ كيلوجرام من الماء من درجة ١٥°م إلى درجة الغليان في زمن قدره ٤٠ دقيقة . فإذا كانت جودة السخان ٨٠٪ فاحسب .

(أ) الطاقة المستهلكة بالكيلوات ساعة .

(ب) سعر الطاقة المستهلكة إذا كان سعر الكيلوات ساعة $\frac{١}{٢}$ ليرة

(جـ) قدرة السخان .

الحرارة اللازمة = ١٣,٦١ × ١ × (١٠٠ - ١٥) = ١١٥٧ كيلوكالوري .

(أ) الطاقة المستهلكة =

$$١١٥٧ \times \frac{١}{٠,٨٠} \times \frac{١}{٨٥٧} = ١,٦٩$$ كيلوات ساعة

(ب) ثمن الطاقة المستهلكة = ٠,٥ × ١,٦٩ = ٠,٨٥ ليرة

(جـ) قدرة السخان = $\frac{١,٦٩}{\frac{٤٠}{٦٠}}$ = ٢,٥٣٥ كيلوات

مثال ٢ : ٣

محطة توليد كهرباء تعمل بالطاقة المائية (هيدروليكية) قدرتها ١٠٠ ميجاوات تعمل على فرق ارتفاع مياه قدره ٢٢٠ متر وتعطي الحمل الكامل لمدة ١٢ ساعة يومياً . فإذا كانت الجودة الكلية للمحطة ٨٦,٤٪ فأوجد حجم الماء اللازم لتشغيل المحطة .

الطاقة اللازمة لعمل المحطة بالحمل الكامل لمدة ١٢ ساعة = ١٠٠ × ١٢ = ١٢٠٠ م وس

= ١٢٠٠ × ١٠^{٦} × ٦٠ × ٦٠ = ٤٣,٢ × ١٠^{١١} وات ثانية .

الطاقة الداخلة للمحطة

$$= \frac{٤٣,٢ \times ١٠^{١١}}{٠,٨٦٤} = ٥ \times ١٠^{١٢} \text{ وات ثانية}$$

= وزن المياه × عجلة الجاذبية × فرق الارتفاع

= وزن المياه × ٩,٨١ × ٢٢٠ .

حجم المياه اللازم لتشغيل المحطة لمدة ١٢ ساعة = وزن المياه

$$= \frac{٥ \times ١٠^{١٢}}{٩,٨١ \times ٢٢٠ \times ١٠^{٣}} = ٢٣,١٧ \times ١٠^{٥} \text{ متر مكعب}$$

مثال ٢ : ٤

طلمبة مياه تعمل بمحرك كهربائي لرفع ٦٨ طن من الماء في الدقيقة لارتفاع قدره ٧ متر . فإذا كانت الجودة الشاملة للمجموعة ٦٨٪ أوجد القدرة الداخلة للمحرك بالكيلوات ـ أوجد ثمن التيار اللازم لتشغيل الطلمبة لمدة ٣٠ يوماً بمعدل ٤ ساعات يومياً إذا كان سعر الكيلوات ساعة ٠,٥

الطاقة اللازمة لرفع المياه = وزن المياه × عجلة الجاذبية × الارتفاع .

= ٦٨ × ١٠٠٠ × ٩,٨ × ٧ = ٤٦٦٤٨٠٠ وات ثانية

قدرة الخرج للطلمبة = $\frac{٤٦٦٤٨٠٠}{٦٠}$ = ٧٧٧٤٧ وات

القدرة الداخلة للمحرك = $\frac{٧٧٧٤٧}{٠,٦٨ \times ١٠٠٠}$ = ١١٤,٥ كيلوات

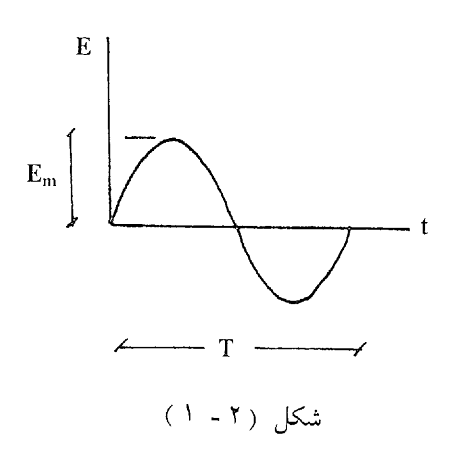
ساعات الشغل = ٣٠ × ٤ = ١٢٠ ساعة

الطاقة المستهلكة= ١١٤,٥ × ١٢٠ = ١٣٧٤٠ كيلوات ساعة

ثمن الطاقة = ١٣٧٤٠ × ٠,٥ = ٦٨٧٠ ليرة

٢ ـ ٤ أساسيات التيار المتردد Alternating Carrent :

تتغير قطبية التيار المتردد بالنسبة لمرجع ثابت في صورة دالة تكون غالباً جيبية الشكل،.شكل رقم(٢ ـ ١) ويحدث ذلك عدد من المرات في الثانية يسمى التردد Fre-quency (F) .



شكل (٢ ـ ١)

ووحدة التردد هي الذبذبة في الثانية Cycle / Second أو الهيرتز Herz (Hz) .

والذبذبة الكاملة هي التغير من وضع معين إلى نفس الوضع في مرة تالية ، أي أن النقطة تعمل دورة كاملة .

والزمن الذي تستغرقه الذبذبة يسمى الزمن الدوري Periodic Time (T) ، حيث $T = \frac{1}{f}$ ثانية .

وتحدد قيمة التيار المتردد بأربعة صفات هي :

- القيمة اللحظية (Instantaneous Value) ، وهي عبارة عن قيمة التيار أو الجهد في أي لحظة .

- القيمة القصوى (Maximum Value) I_m, E_m وهي أقصى قيمة للتيار أو الجهد أثناء الدورة .

- القيمة المتوسطة (Average Value) I_{av}, E_{av} وهي قيمة المتوسط الحسابي للتيار أو للجهد على مدى الدورة .

- القيمة الفعالة (Effective Value) I, V وهي قيمة جذر متوسط المربعات للقيم اللحظية للتيار أو الجهد على مدى الدورة والقيمة الفعالة هي القيمة الأهم للتيار أو الجهد والمستخدمة غالباً لتعريفه . وهي عبارة عن قيمة التيار المتردد التي تعطي نفس التأثير بالدائرة إذا مر بهذه الدائرة تيار مستمر له نفس القيمة .

وتختلف دوائر التيار المتردد عن دوائر التيار المستمر في عدة نواحي ، والتيار المتردد هنا هو تيار تردده عادة ٥٠ ذبذبة في الثانية . فبينما تعتبر أحمال التيار المستمر هي المقاومة الأومية (R) فإن أحمال التيار المتردد تحوي معاوقات أومية (Z) وتتكون من مقاومات ومفاعلات حثية أومية ومفاعلات سعوية أومية . والمفاعلة الحثية عبارة عن المحاثة ، وقيمتها الأومية في حالة التيار المتردد تتناسب مع تردد التيار المار بها تناسباً طردياً . وقيمتها في حالة التيار المستمر صفر أوم ، أي لا قيمة لها في دوائر التيار المستمر بينما لها قيمة كبرى في دوائر التيار المتردد . والمفاعلات السعوية عبارة عن المكثفات ، وقيمتها

الأومية تتناسب تناسباً عكسياً مع التردد . أي أن قيمتها في حاله التيار المستمر ما لا نهاية حيث أن التردد في هذه الحالة صفر .

وتسبب المفاعلات الحثية والسعوية وجود زاوية تسمى زاوية الطور (Phase Angle) بين الجهد والتيار في دوائر التيار المتردد ويسمى جيب تمام هذه الزاوية عامل القدرة (Power Factor) فإذا كانت زاوية الطور (∅) فإن :

$$P.F. = \cos(\varnothing)$$

ويمثل هذا العامل أهمية في دوائر التيار المتردد .

ويمثل الجدول رقم (٢ ـ ٣) القيم الأومية للمكونات المختلفة للدوائر الكهربية .

جدول (٢ ـ ٣)

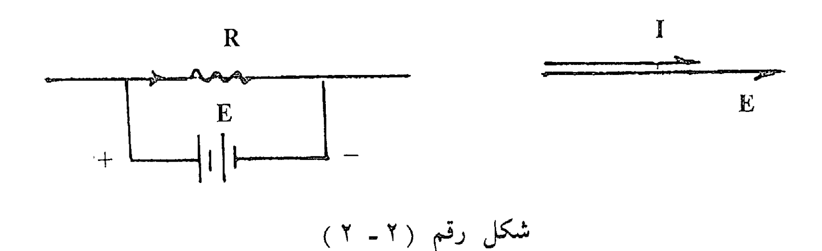
المكونات	القيمة في حالة التيار المستمر (أوم)	القيمة في حالة التيار المتردد (أوم)
المقاومة الأومية	R	R
المفاعلة الحثية لملف ذي حث (L) هنري	Zero	$\omega L = 2\pi f.L$
المفاعلة السعوية لمكثف ذي سعة (C) فاراد	ما لا نهاية	$\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$

$\omega = 2\pi F$

وفيما يلي علاقات الجهد والتيار لمكونات الدوائر الكهربية .

(أ) في حالة المقاومة الأومية (R) :

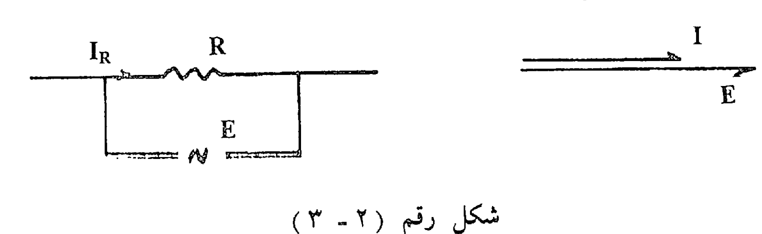
i ـ التيار المستمر .



شكل رقم (٢ - ٢)

يكون الجهد والتيار في اتجاه واحد وتربطهما علاقة قانون أوم $E = I.R$ وتكون القدرة المستنفذة $W = E.I$ Watts .

ii ـ التيار المتردد .

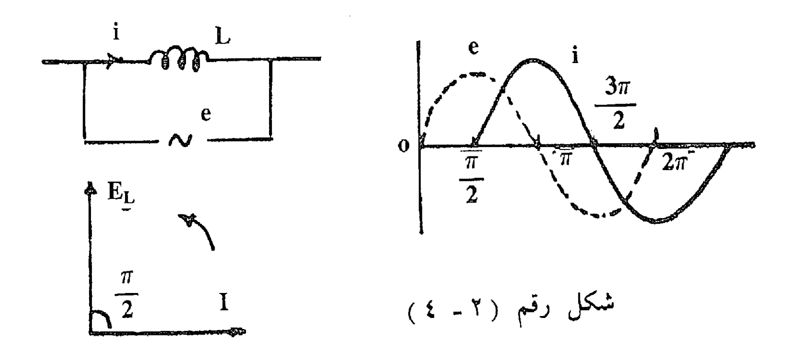


شكل رقم (٢ - ٣)

يكون الجهد والتيار هنا أيضاً في اتجاه واحد شكل (٢ - ٣) وتربطهما علاقة قانون أوم $E = I.R$ والقدرة $W = E.I_R$ Watt .

(ب) حالة المفاعلة الحثية **Inductive Reactance** :

يمثل الشكل رقم (٢ - ٤) جهد متردد مسلط على محاثة قيمتها (L) هنري وتكون القيمة اللحظية للجهد $e = E_m \sin \omega t$ لكن الجهد على طرفي محاثة يمكن وضعه في الصورة :



شكل رقم (٢ - ٤)

$$e = L \frac{di}{dt} = E_m \sin \omega t$$

حيث i = القيمة اللحظية للتيار المار في المحاثة فيكون :

$$i = \frac{E_m}{L} \int \sin \omega t \, dt$$

$$= \frac{E_m}{\omega L} (- \cos \omega t)$$

$$= - \frac{E_m}{\omega L} \cos \omega t$$

$$= \frac{E_m}{\omega L} \sin (\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$i = I_{max} = \frac{E_m}{\omega L} \qquad \text{when } \sin (\omega t - \frac{\pi}{2}) = 1$$

$$i = I_m \sin (\omega t - \frac{\pi}{2}) \qquad (2 - 6)$$

وبالمقارنة بالقيمة اللحظية للجهد نجد أن التيار متأخر **Lag** عن الجهد بزاوية $\frac{\pi}{2}$ أو أن الجهد يتقدم **Lead** عن التيار بزاوية $\frac{\pi}{2}$.

ويمكن تمثيل ذلك متجهياً كما في شكل (٢ - ٤) .

وقد تبين أن :

$$\frac{E_m}{I_m} = \omega L \text{ ohm}$$

أي أن القيمة الأومية للمفاعلة الحثية للتيار المتردد يمكن وضعها في صورة :

$$X_l = \omega L = 2 \pi f.L \qquad \text{ohm}$$

ومن الواضح أن هذه القيمة بالنسبة للتيار المستمر = صفر حيث التردد (f) = صفر والقيمة اللحظية للقدرة المستنفذة في المحاثة يمكن وضعها في الصورة :

$$w = e.i = E_m \sin \omega t . \; I_m \cos \omega t$$

$$= E_m . I_m \left(\frac{1}{2} \sin 2 \omega t \right)$$

وتكون القدرة للدورة الكاملة :

$$P = \frac{E_m . I_m}{2} \int_0^{2\pi} \sin 2\omega t \; dt = 0$$

أي أن معدل القدرة في المحاثة للتيار المتردد = صفر .

وهي أيضاً بالنسبة للتيار المستمر تساوي صفراً حيث أن المفاعلة الحثية تساوي صفراً للتيار المستمر .

ويلاحظ هنا أنه رغم أن معدل القدرة على مدى الدورة يساوي صفراً إلا أنه للقدرة قيمة قصوى هي :

$$P_{max} = \frac{E_m . I_m}{2} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \times \frac{I_m}{\sqrt{2}} = E_{eff.} \times I_{eff}$$

ويكون ذلك عندما تصير قيمة :

$$\sin 2\omega t = 1$$

(جـ) حالة المفاعلة السعوية **Capacitive Reactance** :

يمثل الشكل (٢ ـ ٥) جهداً مسلطاً على سعة قدرها (c) فاراد . فإذا

كانت القيمة اللحظية للجهد :

$$e = E_m \sin \omega t$$

وإذا كانت الشحنة على المكثف ذات قيمة لحظية q كولوم فإن العلاقة بين الجهد والشحنة كالآتي :

$$q = c.e$$

وتكون قيمة التيار المار حسب العلاقة :

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt} \quad c.e$$

$$= \omega.c.\ E_m.\ \cos\omega t$$

$$i = \frac{E_m}{1 / \omega c}\ .\ \cos \omega t$$

ويكون للتيار القيمة القصوى عندما تكون :

$$\cos \omega t = 1$$

أي :

$$I_{max} = \frac{E_m}{1 / \omega c}$$

وبذا يكون :

$$i = I_m \sin (\omega t + \frac{\pi}{2}) \qquad (2 - 7)$$

وتسمى القيمة $X_c = \frac{1}{\omega c}$ المفاعلة السعوية بالأوم وهي في حالة التيار المتردد تساوي $\frac{1}{2\pi\ fc}$ أوم وفي حالة التيار المستمر حيث $f = 0$ تكون قيمتها ما لا نهاية .

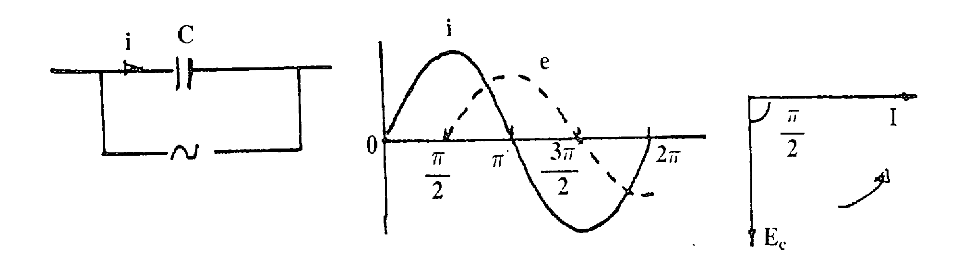
وحيث أن :

$$e = E_m \sin \omega t$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

فإنه يتضح أن التيار هنا متقدم **Leading عن الجهد** بزاوية قدرها $\frac{\pi}{2}$
أو يمكن القول أن الجهد **متأخر Lagging عن التيار** بزاوية قدرها $\frac{\pi}{2}$.

ويمكن تمثيل ذلك متجهياً على النحو المبين بالشكل (٢ ـ ٥) .



شكل (٢ ـ ٥)

والقيمة اللحظية للقدرة هنا :

$$v = e.i = E_m.I_m. \sin \omega t. \cos\omega t$$

$$= \frac{E_m.I_m}{2} \sin 2 \omega t$$

وبالتكامل على مدى دورة كاملة :

$$W = \frac{E_m.I_m}{2} \int_0^{2\pi} \sin 2 \omega t \; dt = 0$$

أي أن معدل قيمة القدرة في السعة للتيار المتردد = صفر .

والقيمة بالنسبة للتيار المستمر تساوي صفر أيضاً حيث أن $I = E.\omega c = 0$ لأن قيمة (ω) هنا يساوي صفر .

ونلاحظ أنه بينما معدل قيمة القدرة على مدى الدورة يساوي صفر فإن القيمة القصوى للقدرة :

$$W_{max} = \frac{E_m . I_m}{2}$$

$$= \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} = E.I \qquad (2.8)$$

ويكون ذلك عندما تصير قيمة :

$$\sin 2\omega t = 1$$

عامل القدرة Power Factor :

يلاحظ من العلاقات السابقة أن معدل قيمة القدرة والتي تمثل القدرة الفعالة في الدائرة يتوقف على نوع مكونة الدائرة المستخدمة .

فهو في حالة المقاومة الأومية (الزاوية بين E,I صفر) يكون :

$$W_R = E.I$$

وفي حالة المفاعلة الحثية (الزاوية بين $E, I = \frac{\pi}{2}$) يكون :

$$W_L = 0$$

وفي حالة المفاعلة السعوية (الزاوية بين $E, I = \frac{\pi}{2}$) يكون :

$$W_C = 0$$

ويمكن بناءاً على ذلك وضع قيمة القدرة الفعالة بالدائرة في الصورة العامة التالية :

$$\mathbf{W = E.I. \cos \emptyset} \qquad \mathbf{(2.9)}$$

حيث ∅ الزاوية بين E,I وتسمى زاوية القدرة .

، $\text{Power Factor} = \cos \varnothing =$ عامل القدرة .

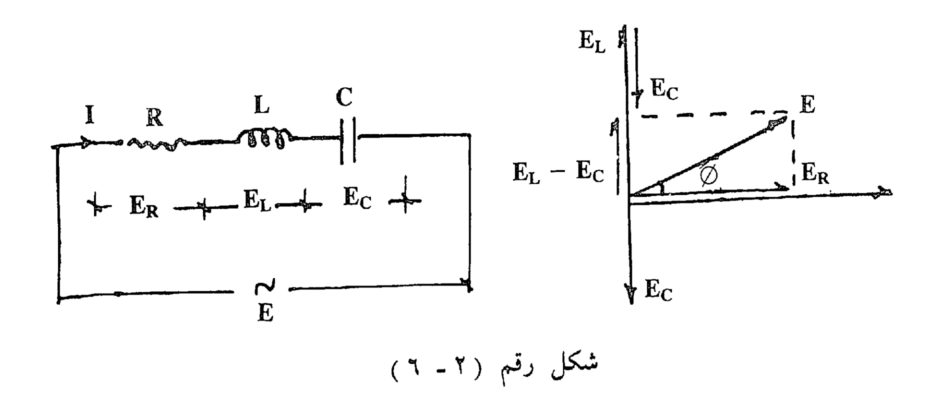
وبتطبيق هذه الصورة نجد أنها تحقق القيمة في الحالات الثلاث .

حيث $\varnothing = 0$ ، $\cos \varnothing = 1$ في حالة المقاومة .

، $\varnothing = \frac{\pi}{2}$ ، $\cos \varnothing = 0$ في حالتي المفاعلات الحثية والسعوية .

(د) حالة المكونات الثلاث موصلة على التوالي في دائرة واحدة :

نفرض دائرة مكونة من مقاومة (R) ، ومفاعلة حثية (X_L) ، ومفاعلة سعوية (X_C) موصلة على التوالي ويمر بها تيار (I) فيمكن إيجاد الجهد والقدرة في الدائرة المبينة بالشكل رقم (٢ - ٦) على النحو التالي :



شكل رقم (٢ - ٦)

يكون في هذه الحالة :

$$E = E_R + E_L - E_C$$

أي أن الجهد الكلي يساوي الجمع المتجهي للجهود عبر المقاومة والمفاعلة الحثية والمفاعلة السعوية :

$$\therefore E = IR + jI.XL - jI.X_C$$
$$= I [R + j (X_L - X_C)]$$

حيث (j) معامل يمثل دوران متجه زاوية قدرها $\frac{\pi}{2}$. وتكون القيمة الرقمية للمتجه :

$$|E| = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = I \sqrt{R^2 + X^2} = I.Z$$

حيث (X) تسمى المفاعلة الكلية بالدائرة .

، (Z) تسمى المعاوقة الأومية الكلية بالدائرة .

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \qquad X = (X_L - X_C),$$

$$X_L = \omega L \qquad , \quad X_C = \frac{1}{\omega C}$$

ويمكن حساب عامل القدرة على النحو التالي :

$$p.f. = \cos \varnothing = \frac{X}{Z} = \frac{X_L - X_C}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

ويكون معدل القدرة الفعالة بالدائرة .

$$W = E.I. \cos \varnothing$$

المعاوقة والمسامحة بالدائرة :

تبين مما سبق أن مكونات الدائرة تسبب وجود مقاومة (R) ومفاعلة حثية (X_L) أو مفاعلة سعوية (X_C) . وكلها بالقيم الأومية .

والمفاعلة الكلية بالدائرة = مجموع المفاعلات الحثية والسعوية بالدائرة .

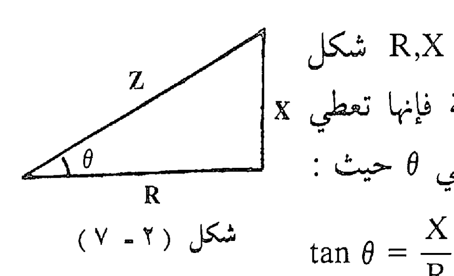
$$X = X_L - X_C \qquad ohm$$

والمعاوقة الكلية بالدائرة لمرور التيار تسمى (Z) impedance .

حيث :

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \text{ohm}$$

وتمثل متجهياً بمثلث أضلاعه R,X شكل (٢ - ٧) وحيث أن Z قيمة متجهية فإنها تعطي بقيمتها الرقمية |Z| وزاويتها مع الأفقي θ حيث :



شكل (٢ - ٧)

$$\tan \theta = \frac{X}{R}$$

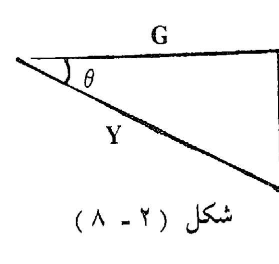
والمسامحة الكلية بالدائرة لمرور التيار تسمى (Y) admittance حيث :

$$|Y| = \frac{1}{|Z|} = \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \sqrt{G^2 + B^2}$$

ومكوناتها هي (G) المواصلة Conductance (mho)

، (B) التقبلية Susceptance (mho)

وتمثل المسامحة متجهياً بمثلث أضلاعه G,B شكل (٢ - ٨) . وحيث أن Y قيمة متجهية فإنها نعطي بقيمتها الرقمية |Y| وزاويتها مع الأفقي .



شكل (٢ - ٨)

$$\tan \theta = \frac{B}{G}$$

ويمكن إيجاد العلاقة بين مكونات Z ومكونات Y على النحو التالي :

$$G = Y \cos \theta = \frac{1}{Z} \cdot \frac{R}{Z} = \frac{R}{Z^2} = \frac{R}{R^2 + X^2} \quad \text{mho}$$

$$B = Y \sin \theta = \frac{1}{Z} \cdot \frac{X}{Z} = \frac{X}{Z^2} = \frac{X}{R^2 + X^2} \quad \text{mho}$$

$$\therefore \; Y = \sqrt{G^2 + B^2} \quad , \; Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

وقيمة كل من Y ، G ، B وحدتها (mho) ولكن هنا سنعتبر التقبلية الحثية (سالبة) ، بينما التقبلية السعوية (موجبة) بعكس الفعاليات ، وتستخدم المسامحة والتقبليات لتسهل كثيراً حل دوائر التوازي .

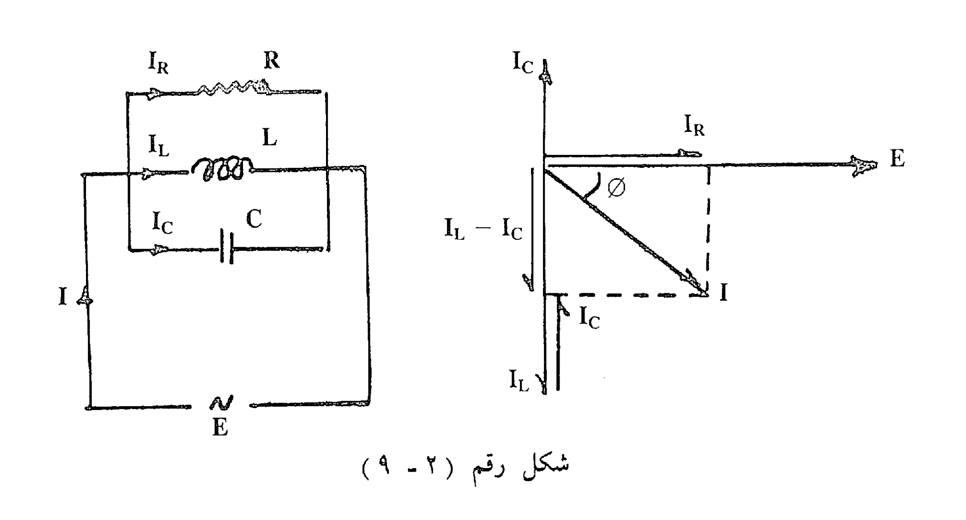
وفيما يلي جدول بين مقارنة بين هذه القيم .

جدول (٢ - ٤)

القيمة	الرمز	الوحدة	المعادل
conductance	G	mho	$G = \dfrac{R}{Z^2}$
susceptance	B	mho	$B = \dfrac{X}{Z^2}$
admittance	Y	mho	$Y = \dfrac{1}{Z}$
resistance	R	ohm	$R = \dfrac{G}{Y^2}$
reactance	X	ohm	$X = \dfrac{B}{Y^2}$
impecance	Z	ohm	$Z = \dfrac{1}{Y}$

(هـ) حالة المكونات الثلاث موصلة على التوازي في دائرة واحدة :

نفرض دائرة مكونة من مقاومة (R) ، مفاعلة حثية (X_L) ، ومفاعلة سعوية (X_C) موصلة مع بعضها على التوازي شكل (٢ - ٩) ومسلط عليها جهد (E) فيمكن ايجاد التيار الكلي والقدرة في الدائرة على النحو التالي :



شكل رقم (٢ ـ ٩)

بطريقة المعاوقة من الرسم المتجهي :

$$\bar{I} = \bar{I}_R + (\bar{I}_L - \bar{I}_C)$$

$$= \frac{E}{R} + j\left(\frac{E}{X_L} - \frac{E}{X_C}\right) \qquad X_L = \omega L \quad , X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$= E\left[\frac{1}{R} + j\left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)\right]$$

$$I = E\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}$$

$$\cos \varnothing = \frac{\frac{1}{R}}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}} = \text{p.f.}$$

وبطريقة المسامحة :

$$Y = Y_R + Y_L + Y_C = \sqrt{G^2 + B^2}$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3 = \frac{R}{Z^2} + 0 + 0$$

$$B = B_1 + B_2 + B_3 = 0 - \frac{X_L}{Z^2} + \frac{X_C}{Z^2} = \frac{X_L + X_C}{Z^2}$$

$$\therefore Y = \frac{1}{Z^2} \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}$$

$$I = V.Y \qquad p.f. = \frac{G}{Y} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}}$$

$$W = E.I. \cos \varnothing$$

٢ ـ ٥ أمثلة محلولة :

مثال ٢ : ٥ :

دائرة تتكون من فرعين موصلين على التوازي . الأول عبارة عن مقاومة قدرها ٦ أوم على التوالي مع مفاعلة حثية قدرها ٨ أوم . والثاني عبارة عن مقاومة قدرها ٨ أوم على التوالي مع مفاعلة سعوية قدرها ٦ أوم سلط على الدائرة جهد قدره ٢٠٠ فولت بتردد ٥٠ هيرتز . أوجد قيمة التيار ومعامل القدرة بالدائرة ثم أوجد قيمة المفاعلة التي يجب توصيلها على التوازي مع الدائرة لرفع عامل القدرة إلى الوحدة .

الفرع الأول :

$$R_1 = 6 \text{ ohm}, \; X_L = 8 \text{ ohm}, \; Z^2_1 = 6^2 + 8^2 = 100$$

$$G_1 = \frac{R_1}{Z_1^2} = \frac{6}{100} = 0.06 \text{ mho}$$

$$B_1 = \frac{X_L}{Z_1^2} = \frac{8}{100} = 0.08 \text{ mho}$$

الفرع الثاني :

$$R_2 = 8 \text{ ohm}, \; X_C = 6 \text{ ohm} \qquad Z^2_2 = 8^2 + 6^2 = 100$$

$$G_2 = \frac{8}{100} = 0.08 \text{ mho}$$

$$B_2 = \frac{6}{100} = 0.06 \text{ mho}$$

$$G = G_1 + G_2 = 0.14 \text{ mho}$$

$$B = -B_1 + B_2 = -0.02 \text{ mho}$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \sqrt{(0.14)^2 + (-0.02)^2} = 0.1414 \text{ mho}$$

$$I = E.Y = 200 \times 0.1414 = 28.28 \text{ amp}$$

$$\text{p.f.} = \cos \varnothing = \frac{G}{Y} = \frac{0.14}{0.1414} = 0.99$$

$$W = E.I. \cos \varnothing = 200 \times 28.28 \times 0.99 = 5599.44 \text{ watt}$$

In order to have p.f. = 1 B must equal zero

∴ a capacitive susceptance must be added of value

$$\frac{1}{X_C} = 0.02 \qquad \therefore X_C = \frac{1}{0.02} = 50 \text{ ohm}$$

مثال ٢ : ٦ :

وصل ملف ذو معاوقة على منبع كهربائي جهده ١٢٠ فولت وتردده ٥٠ ذبذبة فأخذ من المنبع قدرة مقدارها ٤٨٠ وات وتياراً قدرة ٥ أمبير .

احسب :

(أ) معامل القدرة بالدائرة .

(ب) المعاوقة ، المقاومة ، والممانعة الحثية بالدائرة .

(جـ) زاوية الوجه بين التيار والجهد .

القدرة الظاهرية للملف = ١٢٠ × ٥ = ٦٠٠ فولت أمبير

القدرة المسحوبة = ٤٨٠ وات

(أ) ∴ معامل القدرة بالدائرة = $\frac{٤٨٠}{٦٠٠}$ = ٠,٨

(ب) معاوقة الدائرة Z = $\frac{١٢٠}{٥}$ = ٢٤ أوم

مقاومة الدائرة R = $Z \cos \emptyset$ = ٢٤ × ٠,٨
= ١٩,٢ أوم

الممانعة الحثية X_L = $\sqrt{Z^2 - R^2} = Z \sin \emptyset$
= ١٤,٤ أوم

زاوية الوجه = $\cos^{-1} 0.8$ = ٥٢′ ٣٦°

مثال ٢ ـ ٧ :

ملف حثي يأخذ تياراً قدرة ٢,٥ أمبير إذا وصل على بطارية جهدها ٦ فولت ويأخذ تياراً قدره ٤,٥ أمبير إذا وصل على منبع للتيار المتردد جهده ٢٣٠ فولت وتردده ٥٠ ذبذبة وكانت القدرة المستهلكة ٨٠ وات . احسب قيمة المعاوقة والمفاعلة والمقاومة للدائرة على تيار المتردد . وبين سبب اختلاف قيمة المقاومة للتيار المستمر وللتيار المتردد .

المقاومة للتيار المستمر R = $\frac{٦}{٢,٥}$ = ٢,٤ أوم

نفرض أن المقاومة للتيار المتردد = (R + r) .

حيث r هي المقاومة المكافئة للفقد المغناطيسي في القلب الحديدي للملف الخانق .

∴ ٤,٥^٢ (R + r) = ٨٠ وات

∴ R + r = ٣,٩٥ أوم

، r = ٣,٩٥ - ٢,٤ = ١,٥٥ أوم

المعاوقة Z = $\frac{٢٣٠}{٤,٥}$ = ٥١,١ أوم

ويمكن تقسيم القدرة المستهلكة في الملف الخانق إلى قسمين :

(أ) الفقد في المقاومة الأومية ٢,٤ أوم

= ٤,٥^٢ × ٢,٤ = ٤٨,٦ وات

(ب) الفقد في القلب الحديدي (مقاومة مكافئة ١,٥٥ أوم)

= ٤,٥^٢ × ١,٥٥ = ٣١,٤ وات

المجموع = ٨٠, وات

المفاعلة الحثية للدائرة = $\sqrt{Z^2 - (R + r)^2}$

= $\sqrt{}$ ٥١,١^٢ - ٣,٩٥^٢ = ٥٠,٩٤ أوم

معامل الحث الذاتي L = $\frac{٥٠,٩٤}{٢ \times \pi \times ٥٠}$ = ٠,١٦٢٢ هنري

مثال ٢ : ٨ :

مصباح قدرته ٨٠ وات يعمل على جهد ١٠٠ فولت. والمطلوب تشغيله على تيار متردد جهده ٢٣٠ فولت وتردده ٥٠ ذبذبة بتوصيل ملف حثي معه على التوالي شكل (٢ - ١٠) .

أوجد قيمة معامل الحث الذاتي للملف . احسب المصباح كمقاومة أومية .

الجهد المسلط هو المجموع المتجهي للجهد V_L وجهد المصباح ١٠٠ فولت .

شكل (٢ - ١٠)

$$\therefore ٢٣٠ = \sqrt{V_L^2 + ١٠٠^2}$$

$$\therefore V_L = \sqrt{٢٣٠^2 - ١٠٠^2} = ٢٠٧,١ \text{ فولت}$$

$$\text{تيار المصباح} = \frac{٨٠}{١٠٠} = ٠,٨ \text{ أمبير}$$

$$V_L = I.\,X_L$$

$$= ٠,٨ \times ٢ \times \pi \times 50 \times L$$

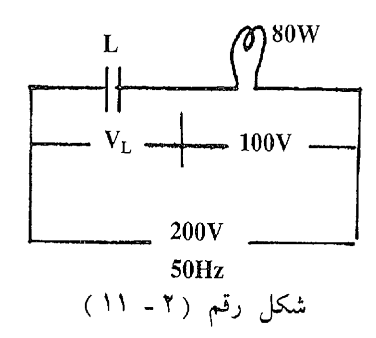
$$= ٢٠٧,١ \text{ فولت}$$

$$\therefore L = ٠,٤٠٣ \text{ هنري}$$

مثال ٢ : ٩ :

في المثال السابق إذا وصل بدلاً من الملف الحثي مكثف على التوالي مع المصباح لكي تعمل المجموعة على منبع جهده ٢٠٠ فولت وتردده ٥٠ ذبذبة أوجد سعة المكثف .

من شكل (٢ - ١١) يمكن استنباط الآتي : -



شكل رقم (٢ - ١١)

$$V_C = \sqrt{٢٠٠^٢ - ١٠٠^٢}$$

= ١٧٣,٢ فولت

$$I = \frac{٨٠}{١٠٠} = ٠,٨$$ أمبير

$$X_C = \frac{V_C}{I} = \frac{١٧٣,٢}{٠,٨}$$

$$= \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f.X_C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times ٢١٦,٥} = ١٤,٧$$ ميكروفاراد

مثال ٢ : ١٠ :

ملف معامل حثه الذاتي ٠,٣ هنري ومقاومته ٥ أوم وصل على التوالي مع مكثف على منبع تردده ٥٠ ذبذبة .

أوجد سعة المكثف اللازم لجعل معامل القدرة للدائرة ٠,٥ متأخر .

$$\cos \varnothing = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{٥}{\sqrt{٥^٢ + X^٢}}$$

$$X = ٨,٦٥$$ أوم $$= X_L - X_C$$

$$X_L = 2\pi.f.L = ٣١٤ \times ٠,٣ = ٩٤,٢$$ أوم

$$X_C = X_L - X = ٩٤,٢ - ٨,٦٥ = ٨٥,٥٥$$ أوم

$$= \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$\therefore C = ٣٧,٢$$ ميكروفاراد

٢ ـ ٦ ـ النظم ثلاثية الطور Three- phase Systems :

تسمى النظم التي تحدثنا عنها حتى الآن نظم أحادية الطور ، ويكون للمنبع طرفان بينهما الجهد المقنن بالتردد المقنن للمنبع . وقد وجد أنه من الممكن اضافة دوائر لملفات أخرى على الجسم الحديدي .

لكي نحصل على مضاعفات للقدرة المولدة من دائرة الملفات الأساسية . ووجد أن أفضل عدد لتلك الدوائر هو ثلاثة حيث أن قدرة الآلة في هذه الحالة تكون ثلاثة أمثال قدرة الآلة ذات الدائرة الواحدة (أحادية الطور) ، حيث أنه عند زيادة عدد الدوائر عن ثلاثة فإن الزيادة في القدرة تكون ضئيلة جداً ، وتسمى الآلة في هذه الحالة **آلة ثلاثية الطور** . وينطبق نفس الكلام على محرك التيار المتردد فإنه يحوي ثلاثة دوائر للملفات مستقلة ، ويسمى المحرك في هذه الحالة ثلاثي الطور . ويدور هذا المحرك بتيار ثلاثي الطور من مولد ثلاثي الطور .

علاقات الجهد والتيار للنظم ثلاثية الطور :

توصل الدوائر الثلاثة الموجودة على جسم المولد أو المحرك في شكل من اثنين .

(أ) شكل النجمة (Star) ويرمز لها بالرمز Y حيث يمثل كل ضلع منها الجهد أو التيار لأحد الدوائر أو أحد الأوجه .

(ب) شكل المثلث (Delta) ويرمز لها بالرمز ▽ ويمثل كل ضلع منها الجهد أو التيار لأحد الأوجه .

ويسمى الجهد على طرفي طور واحد E_{ph}

والتيار في هذا الطور I_{ph}

ويسمى الجهد بين الخطوط الموصلة جهد الخط E_{Line}

والتيار المار بالخط بتيار الخط I_L

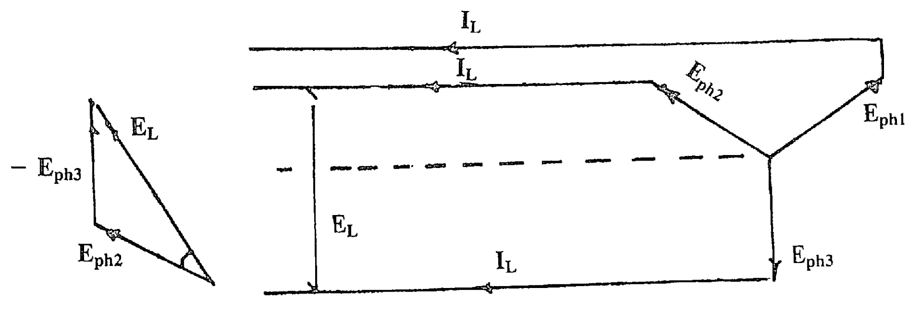
وتختلف العلاقات حسب توصيل الأوجه على النحو الآتي :

حالة النجمة Star :

من شكل رقم (٢ - ١٢) نجد أن :

$$E_L = E_{ph2} - E_{ph3} = 2\,Eph \cos 30 = \sqrt{3}\,E_{ph}$$

$$I_L = I_{ph}$$



شكل رقم (٢ - ١٢)

وتكون القدرة الكلية :

$$W = 3\,W_{ph} = 3\,E_{ph}.\ I_{ph}.\ \cos \varnothing$$

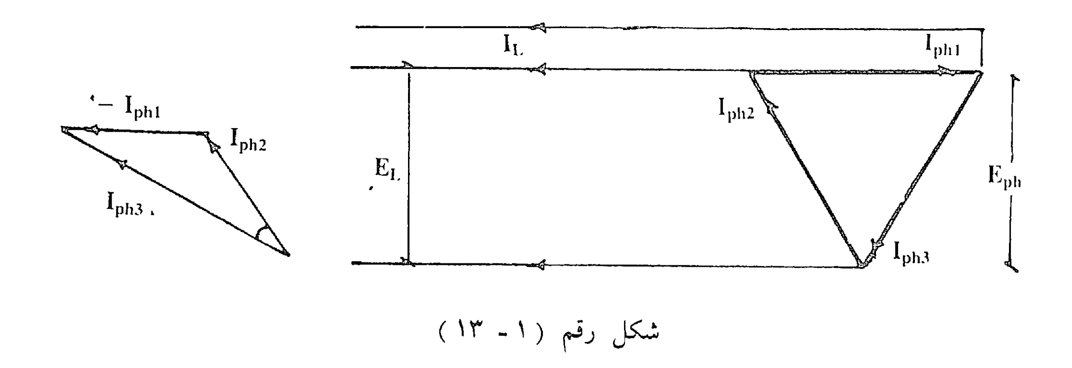
$$= 3\,\frac{E_L}{\sqrt{3}}.\ I_L.\ \cos \varnothing$$

$$= \sqrt{3}\,E_L\ I_L.\ \cos \varnothing$$

حالة المثلث Delta :

من شكل (٢ - ١٣) نجد أن :

$E_L = E_{ph}$ $\qquad$ $I_L = I_{ph2} - I_{ph1} = \sqrt{3} \cdot I_{ph}$



شكل رقم (١ - ١٣)

وتكون القدرة :

$$W = 3 W_{ph} = 3 E_{ph} \cdot I_{ph} \cdot \cos \varnothing$$
$$= 3 E_L \cdot \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cos \varnothing$$
$$= \sqrt{3} E_L \cdot I_L \cdot \cos \varnothing$$

٢ ـ ٧ أمثلة محلولة :

مثال ٢ : ١١

١ ـ ثلاث ملفات متشابهة لكل منها مقاومة ٢٠ أوم وحث ذاتي قدره ٠,٥ هنري وصلت على شكل: (أ) نجمة ،(ب) مثلث على منبع ثلاثي جهده الخطي ٤٠٠ فولت وتردده ٥٠ ذبذبة في الثانية . أوجد التيار الخطي بالدائرة والقدرة المستنفذة في كل حالة .

الحل :

$R_{ph} = 20 \text{ ohm}$

$X_{ph} = 2 \pi f.L = 2 \pi \times 50 \times 0.5 = 157 \text{ ohm}$

$Z_{ph} = \sqrt{20^2 + 157^2} = 158.2 \text{ ohm}$

$$\cos \varnothing = \frac{R_{ph}}{Z_{ph}} = \frac{20}{158.2} = 0.1264$$

(أ) توصيلة النجمة (Star) :

$$E_{ph} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ volt}, \qquad Z_{ph} = 158.2 \text{ ohm}$$

$$I_{ph} = \frac{231}{158.2} = 1.46 \text{ A}, \qquad I_L = I_{ph} = 1.46 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \text{Power} &= \sqrt{3}\ E_L .\ I_L .\ \cos \varnothing \\ &= \sqrt{3} \times 400 \times 1.46 \times 0.1264 = 127.8 \text{ W} \\ &= 3\ I_{ph}^2\ R_{ph} \\ &= 3 \times (1.46)^2 \times 20 = 127.8 \text{ W} \end{aligned}$$

أي أن القدرة المستنفذة تكون في المقاومة الأومية فقط حيث القدرة المستنفذة في الممانعة الحثية تساوي صفراً .

(ب) توصيلة المثلث (Delta) :

$$E_{ph} = E_L = 400 \text{ volt}, \; Z_{ph} = 158.2 \text{ ohm}$$

$$I_{ph} = \frac{400}{158.2} = 2.53 \text{ Amp}$$

$$I_L = \sqrt{3} \times I_{ph} = \sqrt{3} \times 2.53 = 4.38 \text{ Amp}$$

$$\begin{aligned} \text{Power} &= \sqrt{3}\ E_L\ I_L\ \cos \varnothing \\ &= \sqrt{3} \times 400 \times 4.38 \times 0.1264 = 383.9 \text{ W} \end{aligned}$$

ويلاحظ أن قيمة القدرة في هذه الحالة تساوي ٣ أمثال القدرة في حالة توصيل النجمة حيث أن التيار في حالة المثلث يساوي $\sqrt{3}$ × قيمة التيار في حالة توصيل النجمة في كل طور .

مثال رقم ٢ :١٢

ثلاثة معاوقات متماثلة وصلت بشكل مثلث على منبع ثلاثي الأوجه جهده ٤٠٠ فولت . وكان تيار الخط ٣٤,٦٥ أمبير والقدرة المأخوذة من المنبع ١٤,٤ كيلوات . احسب قيمة المقاومة والممانعة لكل معاوقة .

الحل :

حيث أن التوصيل بشكل مثلث :

$$E_{ph} = E_L = 400 \text{ volt}$$

$$I_L = \sqrt{3}\, I_{ph},$$

$$I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{34.65}{\sqrt{3}}$$

$$Z_{ph} = \frac{E_{ph}}{I_{ph}} = 400 \times \frac{\sqrt{3}}{34.65} = 20 \text{ ohm}$$

$$\text{Power} = \sqrt{3}\, E_L.\, I_L.\, \cos\varnothing = 14.4 \text{ K. Watt}$$

$$\cos\varnothing = \frac{14.4 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400 \times 34.65} = 0.599 = \frac{R_{ph}}{Z_{ph}}$$

$$,\ R_{ph} = Z_{ph}.\, \cos\varnothing = 20 \times 0.599 = 12 \text{ ohm}$$

$$X_{ph} = \sqrt{Z_{ph}^2 - R_{ph}^2} = \sqrt{20^2 - 12^2} = 16 \text{ ohm}$$

مثال ٢ ـ١٣

محرك ثلاثي الأوجه قدرته ٧٤,٦ كيلوات ويعمل على جهد قدره ٤٠٠ فولت ومعامل قدره ٠,٨ وموصل بشكل مثلث أوجد تيار الخط وتيار الوجه للمحرك إذا كانت جودة المحرك عند الحمل المقنن ٠,٨٨ .

الحل :

قدرة الخرج للمحرك = ٧٤,٦ كيلوات

قدرة الدخول للمحرك $= \frac{٧٤,٦}{٠,٨٨} =$ ٨٤,٧٧ كيلوات

$= \sqrt{3}\ E_L . I_L . \cos \varnothing$

تيار الخط I_L $= \frac{٨٤,٧٧}{\sqrt{٣} \times ٠,٨ \times ٤٠٠} =$ ١٥٣ أمبير

تيار الوجه I_{ph} $= \frac{١٥٣}{\sqrt{٣}} =$ ٨٨,٣ أمبير

٢ ـ ٨ توليد ونقل وتوزيع القدرة الكهربية :

يتضح مما سبق أن الطاقة في صورها المختلفة يتم تحويلها إلى طاقة ميكانيكية ثم تستعمل المولدات الكهربية لتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربية أي إلى قدرة كهربية تستخدم في أشكال الاستخدامات المختلفة من إنارة وتسخين وتشغيل الأجهزة الالكترونية والآلات الكهربية في المنازل والصناعة ويتطلب ذلك إذاً توليد القدرة الكهربية ثم نقلها من أماكن توليدها حيث تتوفر مصادر الطاقة الطبيعية إلى مراكز استخدامها في الأماكن السكنية والتجمعات الصناعية . ويتم بعد ذلك توزيع القدرة على المستهلكين إما على خطوة واحدة . أو عدة خطوات تتناول مجموعات المستهلكين وفيما يلي نبذة عن كل من هذه الخطوات :

(أ) توليد القدرة الكهربية :

تستخدم لهذا الغرض المولدات الكهربية التي تدار بالطاقة الميكانيكية

الناتجة عن إحدى صور الطاقة السابق شرحها والمولدات الكهربية نوعان :

مولدات التيار المستمر وتعطي تياراً مستمراً يستخدم لأغراض خاصة في الصناعة والنقل وهو غير شائع الاستعمال في المجالات العامة .

مولدات التيار المتردد وتعطي تياراً متردداً تردده ٥٠ ذبذبة في الثانية وتكون إما مولدات صغيرة تدار بماكينات البنزين أو الديزل لتوليد الكهرباء محلياً في مكان استخدامها ويتطلب ذلك نقل الوقود إليها كما تسبب ضوضاء وتلوث للهواء المحيط بالمكان المستخدمة فيه . وتولد هذه الوحدات غالباً تياراً ذا وجه واحد (سلكين) .

وتستخدم مولدات كبيرة ميجاوات أو أكثر في محطات توليد الكهرباء حيث تدار بالطاقة الميكانيكية الناتجة عن طاقة المساقط المائية أو طاقة الوقود في صورة البخار أو آلات الاحتراق الداخلي . وتولد هذه الوحدات غالباً تياراً ذات ثلاثة أوجه لزيادة الاستفادة من المولد .

ولما كان المطلوب من المولدات الكهربية هو توليد قدرة ذات جهد ثابت وتردد ثابت ، لذا فإنها تزود بمنظمات للجهد ومنظمات لسرعة الدوران التي تتحكم في تردد التيار المولد .

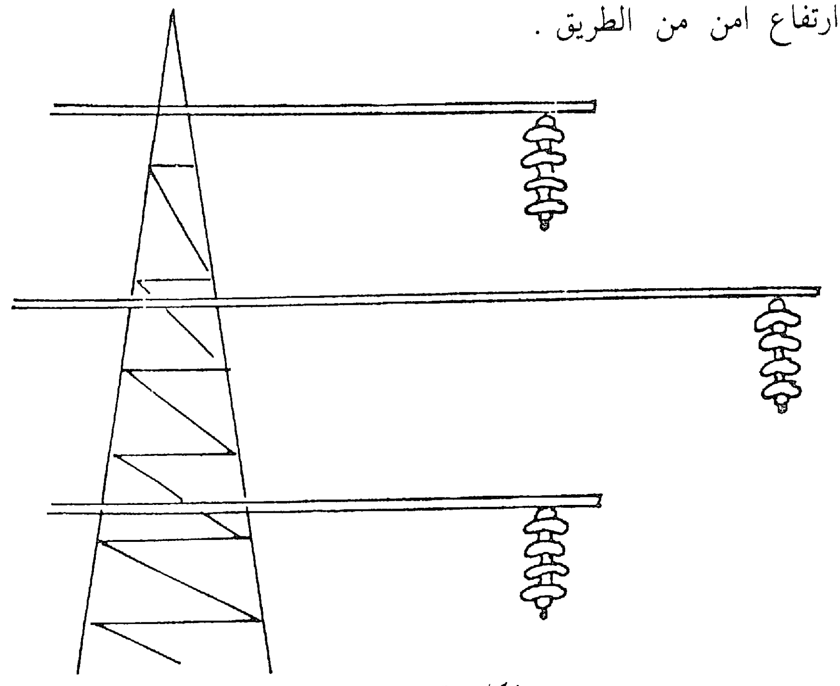
(ب) نقل القدرة الكهربية :

تنقل القدرة الكهربية من أماكن توليدها إلى مراكز استخدامها عن طريق خطوط نقل وهي إما أن تكون كابلات أرضية معزولة أو خطوط نقل هوائية معلقة على أعمدة أو أبراج ويراعي في الكابلات الكهربية أن تكون موصلاتها من النحاس أو الألمنيوم بمقاطع تتناسب مع القدرة التي ستنقلها وأن تكون معزولة ومغلفة بمادة الثرموبلاستيك أو الورق المشبع بزيت العزل ثم تغلف عادة بغلاف من شرائح الصلب لوقايتها من الصدمات الميكانيكية وسوء الاستخدام ثم طبقة من الخيش والبيتومين الذي يمنع عنها الصدأ ويوضع الكابل في مجرى بعمق حوالي ٦٠ سم يفرش بطبقة من الرمل حوالي

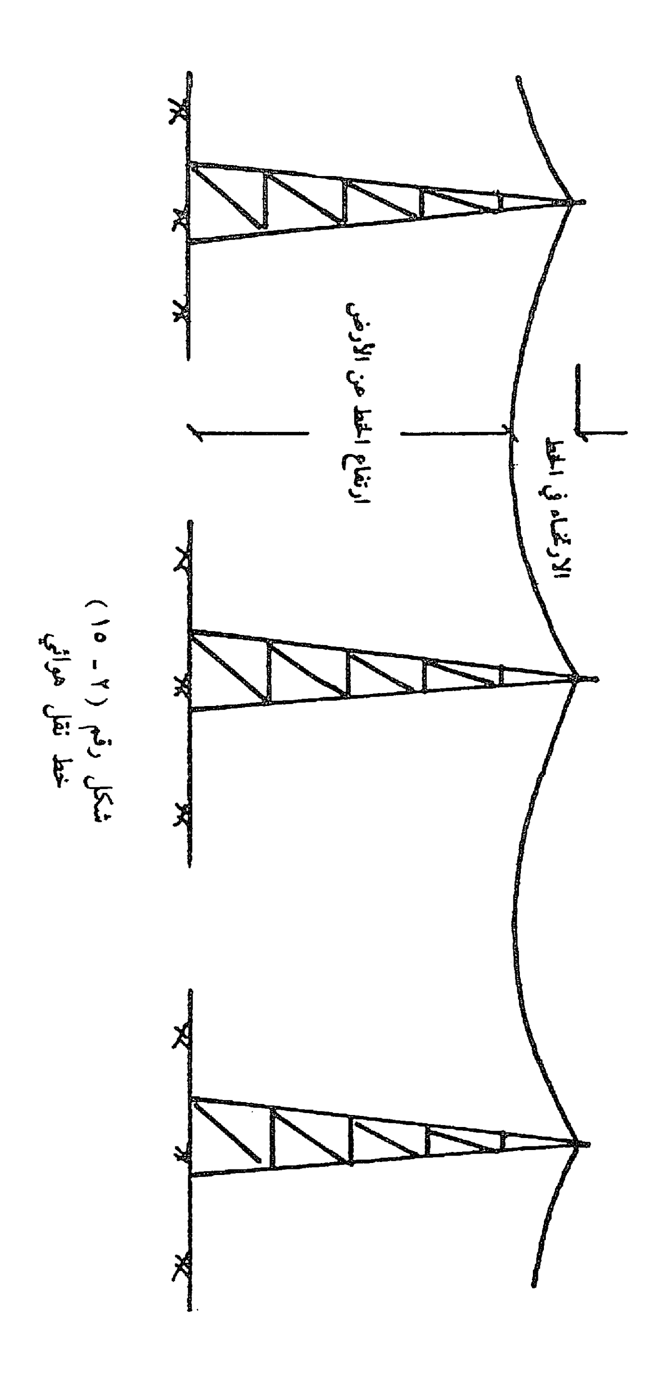
١٠ سم ، سم يوضع الكابل ثم يغطي بطبقة أخرى من الرمل حوالي ١٠ سم ثم يوضع دليل للإرشاد لوجود كابل عند حدوث حفر في المنطقة ثم يردم المجرى بردم عادي يدك جيداً بالماء ثم يرصف الطريق ويوقع مسار مجرى الكابل على الخرائط للاستدلال عليه عند حدوث عطل فيه .

وخطوط النقل الهوائية :

تكون عادة من موصلات مركبة مكونة من أسلاك من الالمنيوم مجدولة حول سلك من الصلب في الوسط ويستخدم الالمنيوم هنا لتوصيل التيار الكهربائي وسلك الصلب ليتحمل الشد الواقع على الموصل . وتكون الموصلات عارية (غير معزولة) خاصة عند النقل لمسافات طويلة وفي الأماكن غير المأهولة حيث تحملها عوازل من الخزف (الصيني) يكون طولها مناسب لجهد القدرة المنقولة وتثبت هذه العوازل إلى أذرع مثبتة إلى أبراج حديدية (شكل ٢ - ١٤) يراعي في ارتفاعاتها أن تكون الموصلات على ارتفاع آمن من الطريق .



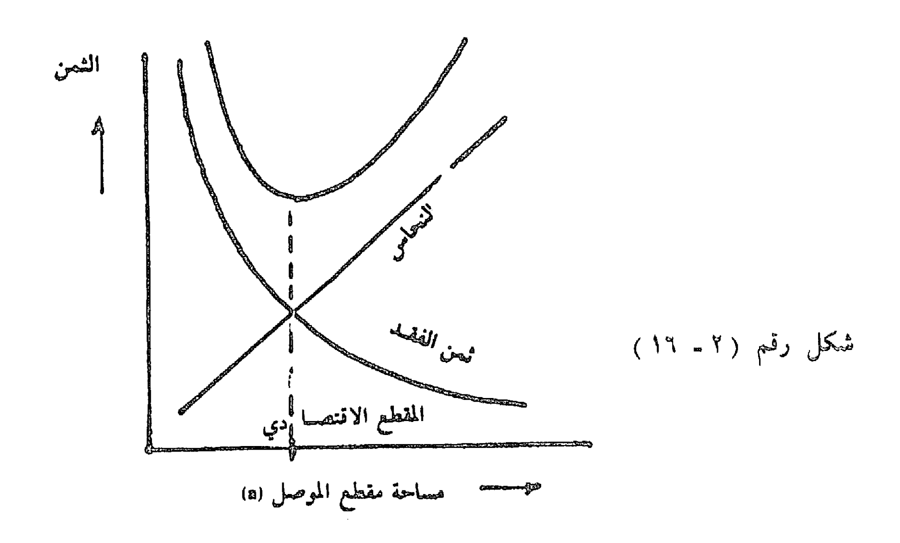
شكل رقم (٢ - ١٤)
برج نقل لخطين ومبين به العوازل الحاملة للموصلات



شكل رقم (٢ - ١٥)
خط نقل هوائي

ويراعي عند مد الخط عمل إرتخاء في وسطه شكل رقم (٢ - ١٥) تحسب قيمته حتى لا يزيد الشد في الموصل عن القيمة القصوى المسموح بها . ويحسب طول الجزء من الموصل بين برجين من الأبراج مع حساب للارتخاء ، لتحديد نقط تثبيت الموصل بالعوازل على الأبراج .

وتنقل القدرة عادة على جهد مرتفع لتقليل تيار النقل وبالتالي مقطع الموصل ، مما يسبب انخفاض في مقطع الموصل يصحبه انخفاض في وزنه وثمنه، ولكن يقابل ذلك ارتفاع مقاومة الموصل لمرور التيار والناتج عن صغر المقطع والذي يتسبب في فقد للقدرة عند مرور التيار لمسافات طويلة . وتعمل بناءاً على ذلك حسابات لاختيار المقطع الاقتصادي وبالتالي جهد النقل الاقتصادي للخط . ويكون ذلك برسم منحنى لتغيير سعر التكلفة الذي يتناسب طردياً مع مساحة مقطع الموصل ويمثل بخط مستقيم كما يتبين من شكل (٢ - ١٦) ، ثم رسم منحنى آخر يمثل سعر القدرة المفقودة الذي يتناسب تناسباً عكسياً مع مساحة مقطع الموصل. ويجمع الثمن الكلي المكون من مجموع الثمنين عند كل مقطع ، فيعطي منحنى يتحدد منه المقطع الاقتصادي للموصل . وقد وجد أنه يكون عندما يتساوى سعر الموصل مع سعر القدرة المفقودة ، ويحسب بناءاً على ذلك التيار والجهد المناسب للنقل .



شكل رقم (٢ - ١٦)

وتستخدم موصلات معزولة هوائية أو كابلات أرضية عندما يخترق الخط منطقة مأهولة .

ويكون جهد التوليد في هذه الحالة متناسباً مع جهد النقل ويصل في بعض الأحيان إلى ٣٦٠٠٠ فولت أي ٣٦ كيلوفولت ولرفع جهد التوليد إلى مستوى جهد النقل تستخدم محولات قدرة (Power Transformers) رافعة الجهد ويوضع هذا الجهد عن طريق مفاتيح توصيل على بداية الخط ويسمى طرف الإرسال كما يسمى الجهد هنا بجهد طرف الإرسال (Sending end Voltage) . وينخفض هذا الجهد عند نهاية الخط بسبب معاوقة الموصلات وتيار الحمل ويكون ذلك بنسبة لا تتجاوز ٥٪ من جهد الارسال ويسمى هذا الانخفاض بتنظيم الجهد (Voltage Regulation) كما يسمى الجهد عند نهاية الخط بجهد طرف الوصول (Receiving end Voltage) ويكون كما قلنا أقل من جهد طرف الإرسال خاصة عند التحميل .

(جـ) توزيع القدرة الكهربية :

يستخدم محول قدرة خافض عند طرف الوصول لخفض الجهد من مستوى جهد النقل إلى مستوى جهد متوسط ، يخفض بعد ذلك في خطوة أخرى إلى مستوى جهد التوزيع . وتخرج مجموعة من الكابلات حاملة جهد التوزيع إلى المناطق المختلفة حيث يدخل كل كابل إلى حجرة تحوي محول توزيع خافض للجهد إلى جهد المستهلك الذي يوصل مباشرة للمستهلك ليستخدمه لأحماله .

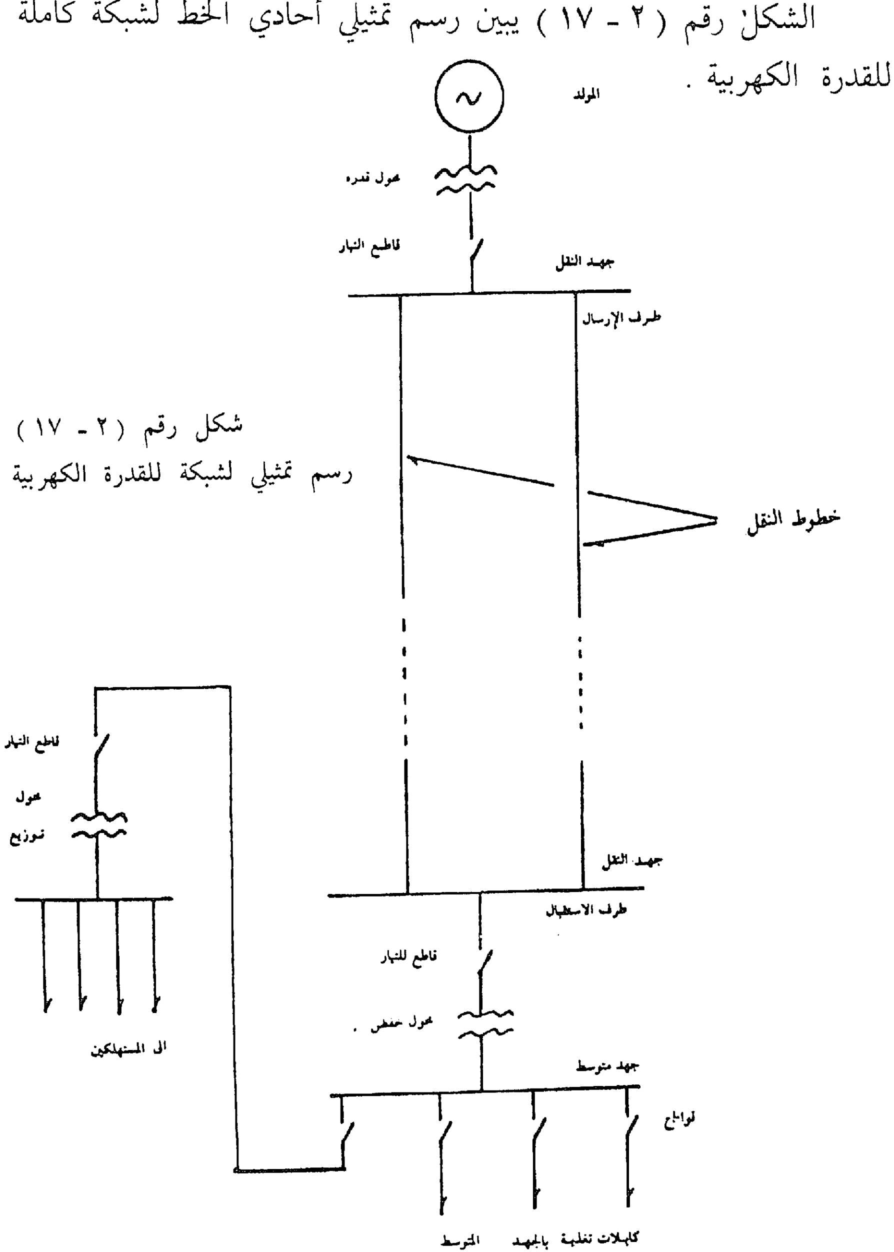
وأمثلة للجهود المختلفة في بعض أنظمة القدرة .

جهد التوليد يكون ٦ ، ١١ ، ٢٣ ، ٣٦ ك . ف

جهد النقل ١١٠ ، ٢٢٠ ، ٤٠٠ ، ٥٠٠ ك . ف

الجهد المتوسط	١١٠ ، ٦٠ ك . ف
جهد التوزيع	٦٠ ، ٣٠ ، ١١ ك . ف
جهد المستهلك	٣٨٠ ، ٢٢٠ ، ١١٠ فولت

الشكل رقم (٢ - ١٧) يبين رسم تمثيلي أحادي الخط لشبكة كاملة للقدرة الكهربية .



شكل رقم (٢ - ١٧)
رسم تمثيلي لشبكة للقدرة الكهربية

الباب الثالث

التمديدات الكهربية بالمباني

المقصود بالتمديدات الكهربية بالمباني ما يقوم به المستهلك من جهته من التركيبات ابتداء من نقطة التغذية من الشبكة العامة (عداد التغذية) . ويتناول ذلك المواد والأدوات المستخدمة وما يلزم من حسابات لاختيار هذه المواد والأدوات ، وكذلك تصميم الدوائر الكهربية الرئيسية والفرعية والدوائر الفرعية النهائية وتصميم لوحات التوزيع الرئيسية والفرعية للمبنى .

٣ ـ ١ الموصلات والكابلات الكهربية :

تستعمل الموصلات والكابلات الكهربية لنقل التيار وتوزيعه على الأحمال المختلفة بالمبنى . وتكون الموصلات والكابلات على النحو التالي :

أولاً ـ الموصلات الكهربية :

تكون الموصلات في احدى الصور الآتية :

(أ) موصلات معزولة بالبلاستيك أو الترموبلاستيك .

(ب) موصلات معزولة بالمطاط ومغلفة بضفيرة من الخيوط .

(جـ) موصلات معزولة ومغلفة بالبلاستيك أو الترموبلاستيك .

وتصنع الموصلات من النحاس أو الألمنيوم وتحدد مساحة مقطع الموصل حسب كثافة التيار التي تتحملها مادة الموصل (بالأمبير لكل ملليمتر مربع) ويلاحظ أن مساحة المقطع للموصلات المصنوعة من الألمنيوم تكون ١,٦ مثل مساحة المقطع للموصلات المصنوعة من النحاس لكي تحمل نفس التيار .

وتسحب الموصلات بداخل مواسير تمدد خارج الحائط أو بداخله أو تحت الأرض . وتوجد أنواع مختلفة من المواسير المستعملة لهذا للأغراض المختلفة وهي :

(أ) مواسير صلب غير معزولة موصلة مع بعضها بجلب قلاوظ محكمة وتستخدم لامرار خط من الموصلات بالأرضيات والطرق والحدائق أو في حالة التركيب خارج الحائط .

(ب) مواسير من المعدن الرقيق معزولة من الداخل (طراز برجمان) وتصنع من الزنك أو الصفيح المطلي بالقصدير أو الألمنيوم الرقيق وتستخدم للتمديدات بداخل الحائط وتستخدم معها علب توصيل من نفس المادة المعدنية وتكون أيضاً مبطنة من الداخل بمادة عازلة . وتثني هذه المواسير عند الانحناءات بواسطة آلة يدوية خاصة ويراعي عند ثني الماسورة ألا يقل القطر الداخلي للإنحناء عن ثلاثة أمثال القطر الخارجي للماسورة .

(جـ) مواسير من البلاستيك أو الترموبلاستيك . وقد أصبح هذا النوع من المواسير شائع الاستعمال ويستخدم داخل الحائط خاصة في الأماكن التي تتعرض للبلل أو الرطوبة التي قد تؤثر على المواسير المعدنية عند استخدامها ، ويتم ثني هذا النوع من المواسير عند الانحناءات عن طريق التسخين الهادىء والثني التدريجي ، ويستحسن ملء الماسورة بالرمل قبل الثني حتى لا يحدث انسداد أثناء الثني . ويراعي في الانحناء نفس الشروط في الحالة السابقة .

(د) المواسير المرنة المصنوعة من البلاستيك أو الترموبلاستيك ويكون جدار الماسورة على شكل لولبي يسمح بسهولة ثني الماسورة . ويستعمل هذا النوع من المواسير بأقطاره المختلفة بكثرة في المباني ويمدد أحياناً في الشدات الخرسانية قبل صبها .

ويجب اتباع الملاحظات الآتية عند تمديد المواسير بداخل الحائط :

١ ـ يجب تثبيت المواسير جيداً في خطوط رأسية أو أفقية والتقطيب عليها .

٢ ـ عدد الانحناءات (الزوايا القائمة) في المسافة بين نهايتين (علبتي توصيل متتاليتين) لا تزيد بتاتاً عن انحنائين .

٣ ـ تستخدم صناديق اتصال على مسافات لا تزيد عن ١٠ متر أو بعد كل انحنائين أو عند التفريعات .

ويبين الجدول رقم (٣ ـ ١) أقصى عدد من الموصلات التي يمكن امرارها داخل ماسورة ذات قطر معين ومقاطع هذه الموصلات . وتستخدم أحياناً مجاري من الصاج ذات مقاطع مربعة أو مستطيلة تثبت داخل أو خارج الحائط ، أو تعلق تحت السقف وتمدد بها الموصلات ثم تغطي بغطاء معدني يثبت بالمسامير ، ويجب توصيل معدن المجرى بالأرض منعاً لأخطار التيار الكهربائي . وتمدد هذه المجاري المعدنية أفقياً أو رأسياً ، وفي حالة التمديد الرأسي يراعي سد الفراغ بالمجرى حول الموصلات بعد مدها بداخل المجرى عند كل دور في الأجزاء التي تخترق فيها المجاري الأسقف لمنع سريان النار من خلال المجاري عند حدوث حريق . وتتميز المجاري عن مجموعات المواسير بإمكان إضافة موصلات بها مستقبلاً علاوة على انخفاض تكاليفها . ويبين الجدول رقم (٣ ـ ٢) عدد الموصلات التي يمكن امرارها بداخل مجرى ذات ابعاد معينة ومقاطع تلك الموصلات .

جدول (٣ ـ ١) ـ عدد الكبلات مفردة القطب المعزولة بالمطاط المكبرت أو البلاستيك المسموح بتركيبها داخل المواسير

نوع المواسير	مواسير معزولة طراز برجمان أو مواسير بلاستيك قطرها الداخلي بالملليمتر	١١	١٣	١٦	٢٣	٢٩	٣٦	...
	مواسير صلب غير معزولة قطرها الخارجي بالبوصة	١/٢	٥/٨	٣/٤	١	$١\frac{١}{٤}$	$١\frac{١}{٢}$	٢
المقطع للكبل مم٢		أقصى عدد من الكبلات يسمح بتركيبه داخل الماسورة						
١		٢	٣	٦	...	...	...	...
$١\frac{١}{٢}$		...	٣	٥	٨	...	...	...
٢		...	٢	٣	٦	...	...	...
٣		...	...	٣	٥	٩	...	...
٤		...	...	٢	٤	٨	...	...
٦		...	...	...	٤	٧	٩	...
١٠		...	...	...	٣	٥	٧	...
١٦		...	...	...	...	٤	٦	...
٢٥		...	...	...	...	٣	٤	٦
٣٥		...	...	...	...	...	٣	٥
٥٠		...	...	...	...	...	٢	٤

جدول (٣ ـ ٢) ـ عدد الكبلات مفردة القطب المعزولة بالمطاط المكبرت أو بالبلاستيك المسموح بتركيبها داخل المجاري الصاج

المقطع الأسمى للكبل مم٢	مقاس المجرى من الداخل				
	٥ × ٥ سم	٧,٥ × ٧,٥ سم	١٠ × ١٠ سم	١٠ × ١٥ سم	١٠ × ٢٠ سم
	أقصى عدد من الكبلات يسمح بتركيبه داخل المجرى				
٣	٣٦	٨٠	...	...	...
٤	٢٨	٦٣	...	...	...
٦	٢٢	٥٠	...	...	...
١٠	١٦	٤٠	٧٢	...	...
١٦	١٤	٣٦	٦٥	...	...
٢٥	٩	٣٠	٤٩	٨٤	...
٣٥	٨	١٩	٣٦	٦٠	٧٤
٥٠	٥	١٢	٢٥	٤٠	٦٠
٧٥	٤	٩	٢٠	٢٨	٣٩
٩٥	٣	٨	١٦	٢٤	٣٥

ملحوظة :

في حالة تركيب كبلات متعددة الأقطاب أو كبلات مفردة القطب ومختلفة المقاطع داخل المجاري الصاج يراعي دائماً ألا تزيد مساحة ما تشغله الكبلات على ٤٠٪ من مساحة مقطع المجرى .

اعتبارات يجب مراعاتها عند استخدام المواسير في التمديدات الكهربية :

١ ـ عدم سحب الموصلات بداخل المواسير إلا بعد تثبيتها بالحائط تماماً .

٢ ـ عند تركيب الخطوط متعددة الأقطاب داخل المواسير يركب كل خط داخل ماسورة خاصة .

٣ ـ في حالة تركيب خطوط بالمواسير أو كابلات خارج الحائط أو على حوامل يترك بين كل خطين مسافة تساوي القطر الخارجي لأكبرها .

ثانياً ـ التغذية بالكابلات :

الكابل عبارة عن مجموعة من موصلات معزولة ومغلفة بمادة عازلة وواقية ويكون عادة إما من موصلين أو ثلاثة أو أربعة موصلات أو أكثر من ذلك كما في كابلات التحكم مثلاً . وتكون الكابلات في احدى الصور الآتية : ـ

(أ) كابل من موصلات معزولة ومغلفة بالترموبلاستيك .

(ب) كابل من موصلات معزولة بالمطاط ومغلفة بالترموبلاستيك .

(جـ) كابل مسلح من موصلات معزولة ومغلفة بالترموبلاستيك .

ثم غلاف من شرائح الصلب لوقاية الكابل من الصدمات الميكانيكية والاحتكاك خاصة عند وضعه تحت الطريق .

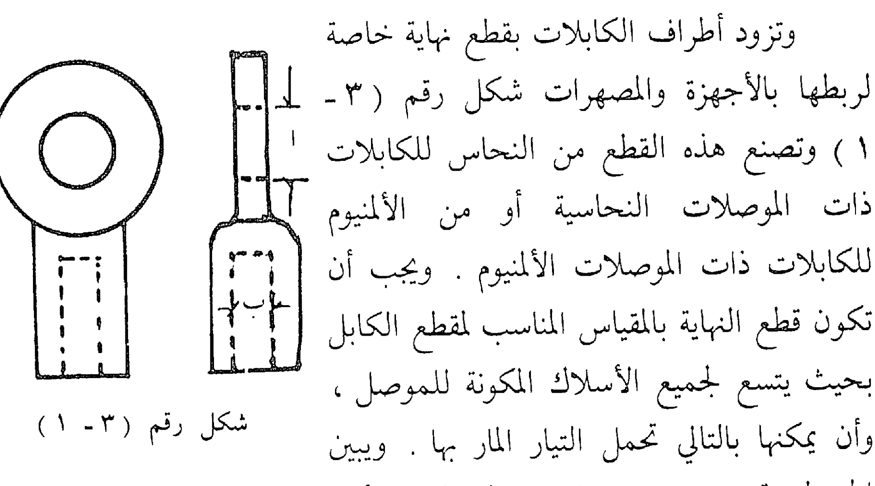
وتميز أطراف الكابل بألوان مميزة حسب استعمال الكابل كما هو مبين بالجدول رقم (٣ ـ ٣) .

جدول (٣ - ٣) - نظام الألوان لتمييز الأقطاب

القطب الكهربائي المتصل به الموصل العاري أو الكبل المعزول	اللون المميز
قطب التأريض	أسود لجميع الأنواع وأخضر أو أبيض شريط أخضر للكبلات المرنة
القطب المكهرب في التيار المتردد ذي الطور الواحد	أحمر
القطب الخامل بالتيار المتردد ذي الطور الواحد (قطب التعادل المؤرض)	أسود
قطب الطور الأول من التيار ثلاثي الأطوار	أحمر
قطب الطور الثاني من التيار ثلاثي الأطوار	أبيض أو أصفر
قطب الطور الثالث من التيار ثلاثي الأطوار	أزرق
القطب الموجب للتيار المستمر ذي السلكين	أحمر
القطب السالب المستمر ذي السلكين	أسود
الأقطاب الرئيسية (موجبة أو سالبة) للتيار المستمر ذي القطبين وخط تعادل الذي يوزع بثلاثة موصلات	أحمر
قطب التعادل للتيار المستمر الذي يوزع بثلاثة موصلات	أسود

ويراعي عند عمل انحناءات بالكابلات غير المسلحة ألا يقل نصف القطر الداخلي للانحناء عن أربعة أمثال قطر الكابل . أما في حالة الكابلات المسلحة فيكون من ١٢ ـ ١٨ مرة القطر الخارجي للكابل .

وتزود أطراف الكابلات بقطع نهاية خاصة لربطها بالأجهزة والمصهرات شكل رقم (٣ ـ ١) وتصنع هذه القطع من النحاس للكابلات ذات الموصلات النحاسية أو من الألمنيوم للكابلات ذات الموصلات الألمنيوم . ويجب أن تكون قطع النهاية بالمقياس المناسب لمقطع الكابل بحيث يتسع لجميع الأسلاك المكونة للموصل ، وأن يمكنها بالتالي تحمل التيار المار بها . ويبين الجدول رقم (٣ ـ ٤) مقاييس قطع النهاية لأطراف الكابل حسب شدة التيار الذي يحمله الكابل .



شكل رقم (٣ ـ ١)

جدول (٣ ـ ٤)

مقاسات قطع النهاية النحاسية لأطراف الموصلات النحاسية

شدة التيار	قطر فتحة تركيب الموصل (ب)	قطر فتحة مسمار الربط (أ)
أمبير	مم	مم
١٥	٤,٨	٤,٨
٣٠	٦,٦	٦,٦
٦٠	٨,٧	٧,٩
١٠٠	١١,١	٩,٥
١٥٠	١٥,٠	١٢,٠
٢٠٠	١٧,٥	١٤,٣
٣٠٠	٢٠,٦	١٧,٥

ويمكن تركيب الكابلات المسلحة بداخل مواسير أو بدون مواسير وكذلك خارج الحائط أو بداخله حسب الحالة المطلوبة . وفي حالة تركيب كابلات مسلحة تحت الأرض بدون مواسير توضع الكابلات في خندق عمقه حوالي ٧٥ سم شكل رقم (٣ - ٢) ، وباتساع كاف لعدد الكابلات بالخندق ، وبحيث يسمح بسهولة الحفر ورمي الكابل . ويسوي قاع الخندق جيداً ويفرش بطبقه من الرمل بسمك حوالي ١٠ سم ثم توضع الكابلات ثم يردم عليها بطبقة أخرى من الرمل بسمك حوالي ١٠ سم وتدك جيداً ثم يكمل الردم بمخلفات الحفر بسمك حوالي ٢٠ سم ثم تمدد اشارة تحذير في صورة شبك من السلك أو شرائط من البلاستيك الملون عليه علامات تحذير أو قوالب من الطوب وذلك للتنبيه لوجود كابل عند الحفر بهذا المكان . ثم يكمل الردم والدك جيداً لمنسوب الأرض .

شكل رقم (٣ - ٢)

هذا وتمرر الكابلات المسلحة بداخل مواسير من الصلب أو الاسمنت المسلح توضع تحت الأرض عند عبور الطرق أو الجسور ويجب في هذه الحالة أن يكون قطر الماسورة أكبر من قطر الكابل بما لا يقل عن ٤ سم بحيث يمكن سحب الكابل للاصلاح أو التغيير دون قطع الطريق بالإضافة إلى وقاية الكابل من أي اجهادات نتيجة لأحمال المرور على هذا الطريق .

ويبين الجدول رقم (٣ - ٥) أنواع الكابلات للاستعمالات المختلفة كما يبين الجدول رقم (٣ - ٦) مقاطع الكابلات البلاستيك المرنة ، المستخدمة لتعليق وحدات الإضاءة علاوة على توصيل التيار ، حسب أوزان وحدات الاضاءة .

جدول (٣ ـ ٥) ـ أنواع كبلات التوصيلات الكهربائية واستعمالاتها

عدد الأقطاب	التكوين	الاستعمال
مفرد مفرد مفرد مفرد	موصل معزول بالمطاط ومغلف بضفيرة من الخيوط المغزولة موصل معزول بالمطاط ومغلف بشريط وضفيرة من الخيوط المغزولة موصل معزول بالمطاط ومغلف بضفيرة من الخيوط المغزولة موصل معزول بالبلاستيك	تركب داخل مواسير أو مجاري صاج للتوصيلات الكهربائية
٢ ـ ٣	موصلات مرنة معزولة بالبلاستيك ومغلفة بالبلاستيك أو المطاط المقاوم لتأثيرات البياض وبحيث تكون الموصلات متوازية ومتباعدة	تركب تحت البياض مباشرة ولا يجوز تركيبها ظاهرة خارج الحوائط .
٢ ـ ٣ ـ ٤ ٢ ـ ٣ ـ ٤ ٢ ٢ ٢ ـ ٣ ـ ٤	موصلات مرنة معزولة بالمطاط ومغلفة بغلاف مستدير من المطاط موصلات مرنة معزولة بالمطاط ومغلفة بغلاف مستدير من المطاط موصلات مرنة معزولة بالمطاط وحشو وغلاف مستدير من الخيوط المغزولة موصلات مرنة معزولة بالبلاستيك ومجدولة موصلات مرنة معزولة بالبلاستيك ومغلفة بغلاف واحد مستدير من البلاستيك	للأجهزة المتنقلة أو لتعليق وحدات الإضاءة ذات الوزن المناسب لقوة تحملها بشرط ألا تقل مساحة مقطعها عن ٠,٧٥ مم٢
٢ ٢	موصلات مرنة معزولة بالبلاستيك وكل موصلين متوازيان وعزلهما ملتصق معاً موصلات مرنة معزولة بالبلاستيك وكل موصلين مغلفان معاً بغلاف بلاستيك مبطط	للأجهزة المتنقلة
٢ ـ ٣	موصلات معزولة بالبلاستيك وكل موصلين مغلفان معا بغلاف بلاستيك مبطط	تركب خارج الحوائط للتوصيلات
٢ ـ ٣ ـ ٤	موصلات معزولة بالبلاستيك ومغلفة بحشو وغلاف بلاستيك مستدير	تركب خارج أو داخل الحوائط أو داخل مجاري أو مواسير صلب تحت الأرض داخل المباني أو هوائياً على شدادات من أسلاك مجلفنة ولا يجوز تركيبها تحت الأرض مباشرة
٨ ـ ١٢ ـ ٢٠	موصلات مرنة معزولة بالمطاط بحشو وغلاف من الخيوط المغزولة	للمصاعد التوصيلات بين الصاعدة وصندوق التوصيل لأجهزة التشغيل

جدول (٣ ـ ٦) أوزان وحدات الإضاءة أو الأجهزة المعلقة ومقطع الكردون المناسب لها .

وزن وحدة الاضاءة أو الجهاز	مقطع الكردون
كيلو جرام	مم^{٢}
٢	٢ × ٠,٧٥
٣	٣ × ٠,٧٥
٣	٢ × ١,٠٠
٤,٥	٣ × ١,٠٠
٤	٢ × ١,٥٠
٦	٣ × ١,٥٠

ملاحظات :

ـ إذا زاد وزن المعلقة على ما هو موضح بالجدول تستخدم سلاسل أو سيقان متصلة بخطاطيف بالأسقف .

ـ في حالة تركيب وحدات إضاءة بأسقف كاذبة يزيد وزنها على ما يمكن أن يتحمله السقف الكاذبة بأمان يراعي تعليق وحدة الإضاءة بالسقف الأصلي .

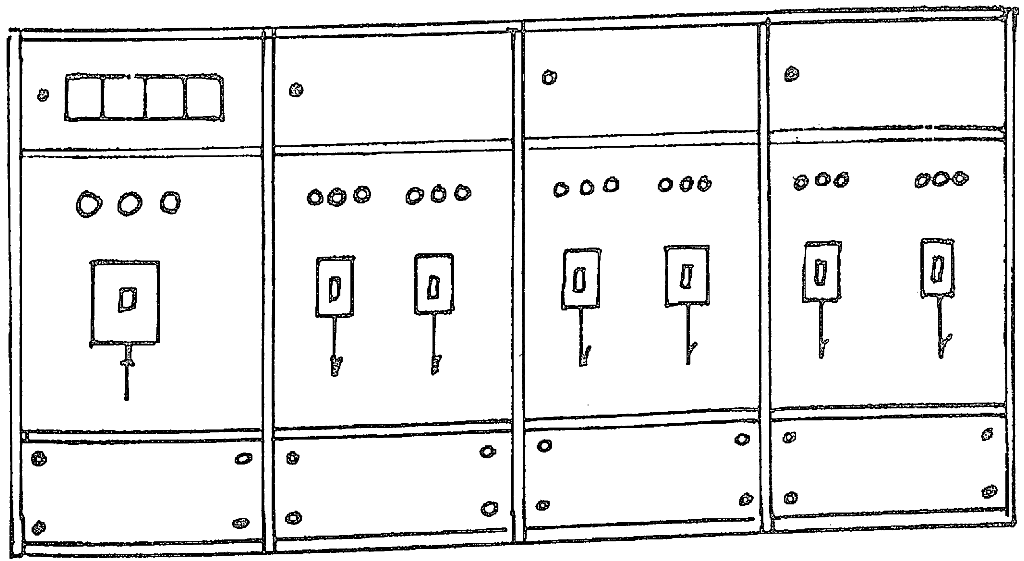
ـ وفي حالة تركيب كبلات أو كردونات مرنة فوق أسقف كاذبة لتغذية وحدات إضاءة أو ما يشابهها يراعي أن تكون من النوع المضاعف العزل .

٣ ـ ٢ لوحات التوزيع :

تستخدم لوحات توزيع تحوي مفاتيح قطع ومصهرات للتحكم في توصيل وقطع التيار في المبنى أو في أجزاء منه . وتكون هذه اللوحات إما لوحات عمومية أو لوحات رئيسية أو لوحات فرعية . وتصنع اللوحات عادة من الصاج سمك ١ إلى ٢ مم حسب حجم اللوحة ويثبت على هيكل من الزوايا والخوص الحديدية للتقوية ، وتطلي اللوحة من الداخل والخارج جيداً بطلاء مانع للصدأ . ويختلف تصميم اللوحة حسب الغرض المستخدمة من أجله اللوحة . وفيما يلي وصف للأنواع المختلفة من اللوحات :

أولاً ـ اللوحات العمومية للتوزيع :

تستخدم هذه اللوحات في الأماكن التي تحوي أكثر من مبنى أو في المشروعات التي تحوي أقسام متباعدة . وتعتبر اللوحة العمومية المدخل الرئيسي للتيار بالمشروع وتقسم اللوحة إلى عدة خلايا منها واحدة أو أكثر للدخول يدخل إلى كل منها كابل للتغذية وتزود هذه الخلية أيضاً بعدة أجهزة لقياس الجهد والتيار والقدرة والتردد وعامل القدرة . اما باقي الخلايا فتكون خلايا خروج للكابلات الموصلة من اللوحة العمومية إلى اللوحات الرئيسية لأقسام المشروع المختلفة . ويحكم كل كابل سواء في الدخول أو الخروج ثلاثة مصهرات من النوع سريع القطع ثم مفتاح ثلاثي بقدرة مناسبة مزود بوقاية ضد القصر وأخرى ضد زيادة الحمل . وتكون المصهرات والمفاتيح بمقننات تيار حسب الحمل الذي يحمله المغذي الذي تستخدم معه المصهرات والمفاتيح .

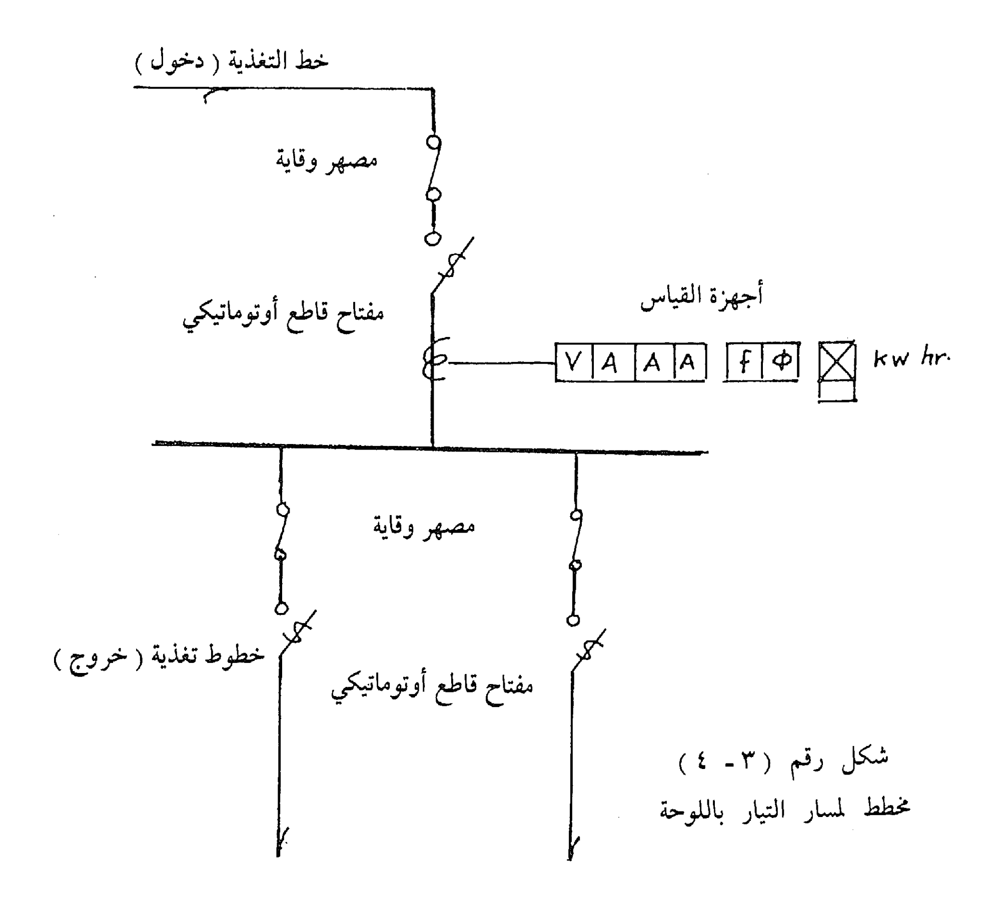


شكل رقم (٣ ـ ٣) لوحة توزيع عمومية

ويبين شكل رقم (٣ ـ ٣) تكوين اللوحة حيث تتكون كل خلية من ثلاثة أجزاء الجزء العلوي ويطل على قضبان التوزيع ، الجزء الأوسط حيث

توجد المفاتيح والمصهرات وتمرر الكابلات ، الجزء الأسفل حيث تثبت الكابلات عند صعودها من خندق تحت اللوحة إلى أماكن توصيلها بالخلايا . وتزود كل خلية بثلاث لمبات بالألوان الأحمر والأصفر والأخضر على كل مفتاح لبيان وصول التيار للخط بالأوجه الثلاثة .

ويبين شكل رقم (٣ - ٤) مخطط أحادي الخط لمسار التيار باللوحة حيث يمثل كل كابل ذي أربعة موصلات بخط واحد .



شكل رقم (٣ - ٤)
مخطط لمسار التيار باللوحة

ويبلغ ارتفاع اللوحة عادة ما بين ٢ ، ٢,٢٠ متراً وعمقها حوالي ٩٠ سم . ويعتمد عرضها على عدد الخلايا المستخدمة بحيث يكون عرض كل خلية حوالي ٧٠ سم .

وتوضع اللوحة العمومية في مكان مركزي من أقسام المشروع بهدف تقصير المسافات بينها وبين الأقسام المختلفة وكذلك لكي يسهل الوصول إليها عند اللزوم ، كما يجب أن تكون في نفس الوقت بمنأى عن متناول غير المختصين . كما يجب تأريض جسم اللوحة للوقاية من الأضرار الكهربية عند حدوث تلامس بين أحد الكابلات وجسم اللوحة .

ثانياً ـ لوحات التوزيع الرئيسية :

تستخدم لوحة من هذا النوع في كل قسم من أقسام المشروع أو كل مبنى من المباني بحيث يدخل اليها كابل التغذية المخصص للمكان والقادم من اللوحة العمومية ويخرج منها الكابلات الموصلة للوحات الفرعية بأنحاء المبنى أو القسم . وهي تشابه في التكوين اللوحة العمومية وتزود بأجهزة القياس المناسبة حسب الطلب .

ثالثاً ـ لوحات التوزيع الفرعية :

توضع لوحة من هذا النوع في كل وحدة من وحدات المبنى (كل طابق أو كل وحدة سكنية . . . الخ) لتحكم الدوائر الفرعية النهائية الخارجة منها والمغذية للأحمال ، ويدخل إليها مغذي قادم من اللوحة الرئيسية . وتكون اللوحة صغيرة الحجم بحيث تناسب المعدات التي ستوضع عليها . وهي عادة عبارة عن :

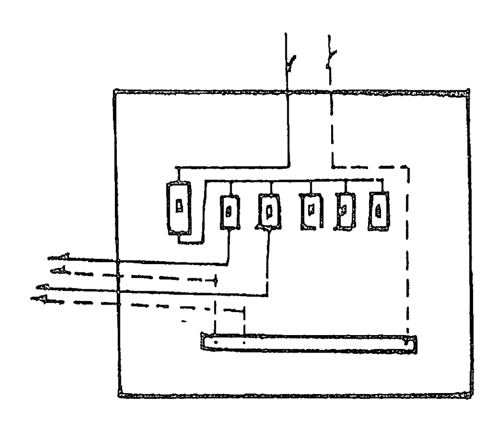
٢ مصهر للدخول بمقنن مناسب لشدة التيار بكابل التغذية .

١ مصهر لكل دائرة خروج بمقنن مناسب لتيار الدائرة .

ويمكن استبدال المصهر بمفتاح مصهر أوتوماتيكي يسقط عند ارتفاع التيار أو عند القصر ويتطلب الأمر اعادته لوضعه لاعادة توصيل التيار . هذا ويكتفي بمصهر واحد للدخول إذا كان الدخول بموصل مكهرب وموصل

أرضي . ويوضع مصهر الخروج على الطرف المكهرب للخط بينما تجمع جميع الأطراف الأخرى للدخول والخروج وتوصل مع بعضها بالطرف المؤرض للتيار عن طريق قضيب توصيل كما هو مبين بشكل رقم (٣ـ ٥) .

وتصنع اللوحة من الصاج المطلي أو من الرخام النقي أو من مادة عازلة صلبة مثل الباكسولين يثبت عليها المصهرات أو المفاتيح وتعمل لها علبة من الصاج أو البلاستيك الغير قابل للحريق . وتثبت على وجه الجدار أو يدفن جزء منها داخل الحائط ويعمل لها غطاء على شكل باب مفصلي .



شكل رقم (٣ـ ٥) لوحة التوزيع الفرعية

٣ ـ ٣ دوائر التغذية :

هناك ثلاث أنواع من دوائر التغذية التي تستخدم في التمديدات الكهربية وهي دوائر التغذية الرئيسية ، الدوائر الفرعية ، الدوائر الفرعية النهائية . وفيما يلي خواص كل من هذه الأنواع .

أولاً ـ دوائر التغذية الرئيسية :

الدائرة الرئيسية هي الدائرة المغذية لوحدة متكاملة وتمثل الجزء بين العداد ولوحة التوزيع الفرعية الخاصة بالوحدة وتكون عادة في صورة

موصلات معزولة بداخل ماسورة أو كابل بداخل ماسورة حسب القواعد المذكورة في شرح الموصلات . وتحسب مساحة المقطع المناسبة في كل حالة على أساس قيمة التيار المنتظر مروره بالخط ، كما تراعي قواعد الوقاية اللازمة .

ثانياً ـ الدوائر الفرعية :

الدائرة الفرعية هي الدائرة التي تخرج من لوحة التوزيع الفرعية الخاصة بالوحدة لتغذية بعض أحمال محددة . وهي تمثل الجزء المشترك من دائرة تغذية هذه الأحمال ، وتتكون عادة من موصلات معزولة بداخل ماسورة . بحيث تكون مقاطع الموصلات مناسبة للتيارات المارة بها واللازمة لكل الأحمال التي تغذي من هذه الدائرة .

ثالثاً ـ الدوائر الفرعية النهائية :

تمثل الدائرة الفرعية النهائية الجزء من الدائرة بين الدائرة الفرعية والحمل المغذي منها وتكون عبارة عن موصلات معزولة بداخل مواسير حسب الموضح في شرح الموصلات . وتكون مقاطع الموصلات مناسبة للأحمال التي تغذيها .

ويراعي في الدوائر الكهربية بأنواعها ما يأتي :

١ ـ يجب وقاية كل دائرة فرعية بمصهر أو مفتاح مصهر مزدوج على لوحة التوزيع الفرعية . وإذا اشتملت الدائرة على قطب تعادل مؤرض فيكتفي بوقايتها بمصهر مفرد يركب على الموصل المكهرب ، اما الموصل الخامل فيربط بمسمار خاص بقطب التعادل بلوحة التوزيع .

٢ ـ تحسب مقاطع كابلات الدوائر الفرعية النهائية التي تغذي عدداً من مخارج وحدات الإنارة للحمل الكامل دون معامل وعلى أساس ١٠٠ وات لكل مخرج إنارة على الأقل . أما إذا زاد الحمل الفعلي عن هذه القيمة

فيحسب المقطع على أساس الحمل الفعلي للمخرج (الثريات مثلاً) وفي حالة الأحمال الحثية (المصابيح الفلورية مثلاً) يحسب التيار على أساس ١,٢٥ مرة التيار الفعلي المار بالدائرة . ويجب ألا يقل مقطع أي موصل بالدائرة الفرعية عن ١ مم^{٢} مهما كان الحمل صغيراً .

٣ ـ يراعي ألا تشترك أكثر من دائرة فرعية في أي جزء منهما حتى في الموصلات المتصلة بقطب التعادل . ويجوز اشتراك دائرتين في ماسورة واحدة بشرط أن تكونا مغذيتين من نفس طور التيار ، وأن يكون لكل دائرة خط تعادل مستقل .

٤ ـ يراعي تحميل المقابس على دوائر فرعية مستقلة عن الدوائر الخاصة بمخارج الإنارة كلما أمكن .

٥ ـ يراعي في المآخذ التي تركب في الحمامات والمطابخ أو ما يماثلها أن تكون ذات ثلاث أقطاب ، قطبين للتيار وقطب أرضي . ويحظر استخدام القطب الخامل كقطب أرضي حتى لو كان هو نفسه مؤرضاً .



الباب الرابع

الحسابات الخاصة بمشروع للتمديدات الكهربية بمبنى

٤ ـ ١ حساب القدرة اللازمة للتغذية :

تحسب القدرة اللازمة لكل جزء بالمبنى ، مع احتساب الأجهزة والمعدات الكهربية التي يحتمل استخدامها وصولاً إلى القدرة الكلية للمبنى . وبمعرفة الجهد يمكن حساب التيار وبالتالي مقطع الكابل ومعدات التوصيل اللازمة .

ويبين الجدول رقم (٤ ـ ١) القدرات التقديرية للأجهزة الكهربية المنزلية شائعة الاستعمال والجدول رقم (٤ ـ ٢) القدرة التقديرية اللازمة لتشغيل المصاعد الكهربية .

جدول رقم (٤ ـ ١) القدرات التقديرية للأجهزة الكهربية المنزلية

الجهاز	القدرة بالوات
محمر الخبر	٥٠٠
المكواة	٥٠٠ - ١٠٠٠
الطباخة الكهربية	١٥٠٠
مجفف الشعر	٥٠٠
سخانات الحمام ١٥ لتر	٢٠٠٠ - ٣٠٠٠

تابع :

الجهاز	القدرة بالوات
٦٠ لتر	٣٠٠٠ - ٥٠٠٠
٨٠ لتر	٤٠٠٠ - ٦٠٠٠
الثلاجة	١٠٠ - ١٦٠
جهاز الراديو	٣٠ - ١٠٠
جهاز التليفزيون	٢٠٠ - ٣٠٠
المكنسة الكهربية	١٥٠ - ٣٠٠
دفاية الحجرة	١٥٠٠
غسالة كهربية	٣٠٠
غسالة كهربية بالسخان	٦٣٠٠
مجفف الغسيل	١٠٠
غلاية المياه	٧٠٠

جدول رقم (٤ - ٢) القدرة اللازمة لتشغيل المصاعد الكهربية

عدد الأفراد	الحمولة كج	قدرة المحرك حصان
٣	٢٤٠	٣ - ٤
٤	٣٢٠	٤ - ٥,٥
٥	٤٠٠	٥ - ٦,٥
٦	٤٨٠	٥,٥ - ٨,٥
٨	٦٤٠	٨ - ١١
١٠	٧٥٠	١٣
١٢	٩٠٠	١٦

ونظراً لأنه في أغلب الأحيان لا تستعمل الأحمال في مكان ماكلها في وقت واحد ، لذا فإنه يمكن احتساب عامل تحميل مناسب لحساب شدة التيار المنتظر مروره بموصلات المغذيات . وتكون شدة التيار بالقواطع أو المصهرات التي تحكم هذه المغذيات مساوية لشدة التيار المنتظر مروره بها طبقاً لهذا الحساب . أما شدة تيار التشغيل للمصهر الرئيسي أو للقاطع الرئيسي فتكون

مساوية لمجموع شدة التيارات المنتظر مرورها بجميع المغذيات المتفرعة من المصهر أو القاطع .

بعد حساب القدرة التقريبية الكلية أو التيار الكلي اللازم لتغذية المبنى يمكن تحديد مقطع الكابل اللازم لحمل هذا التيار . ويتم اختيار المكان الذي سيدخل منه كابل التغذية لداخل المبنى وكذلك الأجهزة اللازمة والتي تكون في إحدى الصور المبينة بشكل رقم (٤ ـ ١) . ويلاحظ هنا أن الجزء من دخول كابل التغذية وحتى عداد الطاقة هو من اختصاص المؤسسة الموردة للكهرباء بينما الجزء من عداد الطاقة وحتى لوحة التوزيع وما بعده من اختصاص المشترك . وتختلف الصورتان في أن مفتاح التوصيل والمصهر في الصورة الأولى استبدل في الصورة الثانية بمفتاح قاطع أوتوماتيكي يفصل التيار تلقائياً عند زيادة الحمل أو عند حدوث قصر في الدائرة وذلك لحماية دائرة التغذية .

شكل رقم (٤ ـ ١)

وتكون المصهرات إما من النوع المقفل وتستخدم فيه خرطوشة (Cartridge) من الخزف تحوي سلك التوصيل الذي ينصهر عند حدوث قصر أو زيادة في الحمل ويلزم حينئذ تغيير الخرطوشة بأخرى جديدة ، أو من النوع نصف المقفل ويتكون من حامل من الخزف به قطعتين من النحاس

يربط بينهما سلك التوصيل ، وعند انصهار هذا السلك يستبدل بسلك آخر بمقطع مناسب حسب المبين بالجدول رقم (٤٠ ـ ٣) .

جدول رقم (٤ ـ ٣) قطر سلك المصهر للمصهرات المختلفة .

التيار المقنن للمصهر بالأمبير	٣	٥	١٠	١٥	٢٠	٢٥	٣٠	٤٥	٦٠	٨٠	١٠٠
قطر سلك المصهر (مم)	٠,١٥	٠,٢	٠,٣٥	٠,٥	٠,٦	٠,٧٥	٠,٨٥	١,٢٥	١,٣٥	١,٨	٢,-

أولاً ـ شروط عامة :

١ ـ أن تكون التغذية من عند نقطة متوسطة بالنسبة للأحمال بالمبنى .

٢ ـ استيفاء احتياجات الكهرباء من حجرات المحولات ولوحات التوزيع . . (الخ) .

٣ ـ الحصول على موافقة الجهات المختصة فيما يختص بموقع حجرة المحولات وتصميمها .

ثانياً ـ شروط فنية :

١ ـ يجب أن يحكم جميع التركيبات الكهربية بالمبنى قاطع عمومي فاصل للتيار .

٢ ـ يجوز أن يحكم التركيبات مفتاح ومصهر كما يجوز في الأحوال العادية الاكتفاء بفصل التيار بواسطة المصهرات فقط .

٣ ـ تكون القواطع والمفاتيح والمصهرات مزدوجة أو ثلاثية حسب عدد أقطاب التيار المستخدم .

٤ ـ ٢ تصميم مشروعات التمديدات الكهربية بمبنى :

عند تصميم مشروعات التمديدات الكهربية يمكن الاسترشاد بالملاحظات الآتية :

(أ) توصل المقابس على أساس كل ستة مقابس على دائرة بتيار ١٥ أمبير أو ثمانية مقابس على دائرة بتيار ٢٠ أمبير وتحدد على هذا الأساس دوائر المقابس بالمكان والتيار اللازم لها . وعلى العموم يمكن احتساب حمل ١٣٠٠ وات لكل دائرة من دوائر المقابس .

(ب) يحسب الخط الخاص بالانارة على أساس ١٣٠٠ وات لكل دائرة إنارة .

ويكون بذلك العدد الكلي للدوائر المطلوبة هو مجموع .

عدد دوائر المقابس + عدد دوائر الإنارة .

ويضاف إليها ٢٠٪ من المجموع كدوائر احتياطية فيصير المجموع الكلي للدوائر المطلوبة .

(جـ) تحسب لوحة التوزيع على النحو التالي :

$$\text{عدد الدوائر باللوحة} = \frac{\text{المجموع الكلي للدوائر}}{\text{عدد لوحات التوزيع}}$$

ويضاف بكل لوحة ١٠٪ تترك خالية لاحتياجات مستقبلية ، على أن يكون المجموع الكلي لعدد الدوائر باللوحة عدد زوجي .

(د) تحسب القدرة الخاصة بكل لوحة على النحو التالي :

القدرة الكلية = عدد الدوائر باللوحة × ١٣٠٠ وات

يضاف + ٢٥٪ احتياطي .

وتكون هذه القدرة هي الحمل على الكابل المغذي للوحة بالكيلوات

ويكون التيار بالكابل = $\frac{\text{الحمل على الكابل المغذي}}{\sqrt{3}\, V_L . \cos \varnothing}$ أمبير

وذلك في حالة التغذية بتيار ثلاثي الأطوار ،

ويكون التيار = $\frac{\text{الحمل على الكابل المغذي}}{\text{الجهد}}$ أمبير

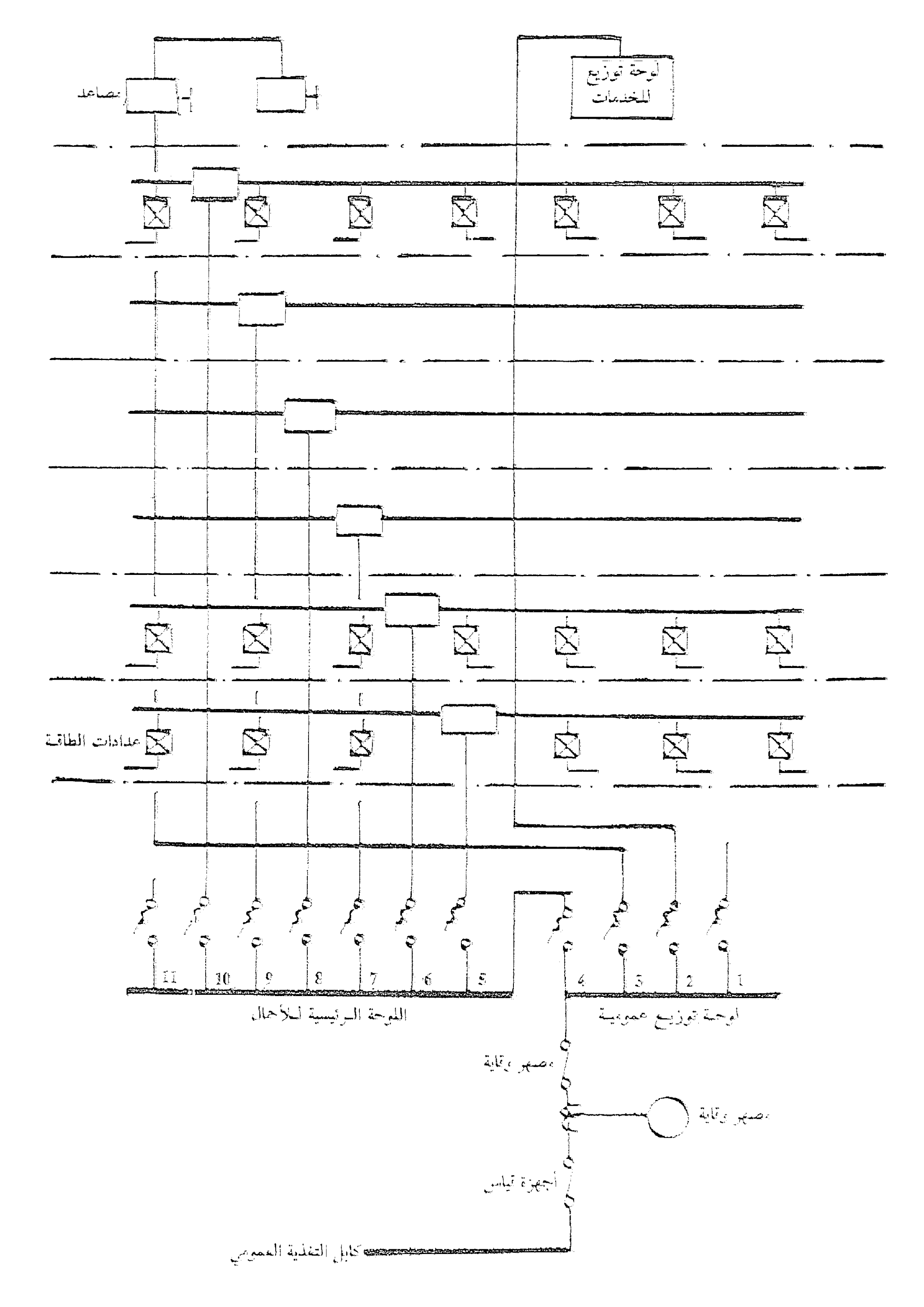
وذلك في حالة التغذية بتيار أحادي الطور .

هذا ويعمل جدول للأحمال على كل لوحة فرعية تبين فيه الأحمال ونوع كل منها (اضاءة ـ مقابس) وتوزع الأحمال على الخطوط الثلاثة للتيار بحيث تكون متساوية على الأطوار الثلاثة بقدر الإمكان . ثم يحسب لكل لوحة القيمة القصوى لتيار الخط ، ومقنن القاطع الرئيسي ، تيار الفصل للوقاية ومقطع الكابل المغذي للوحة .

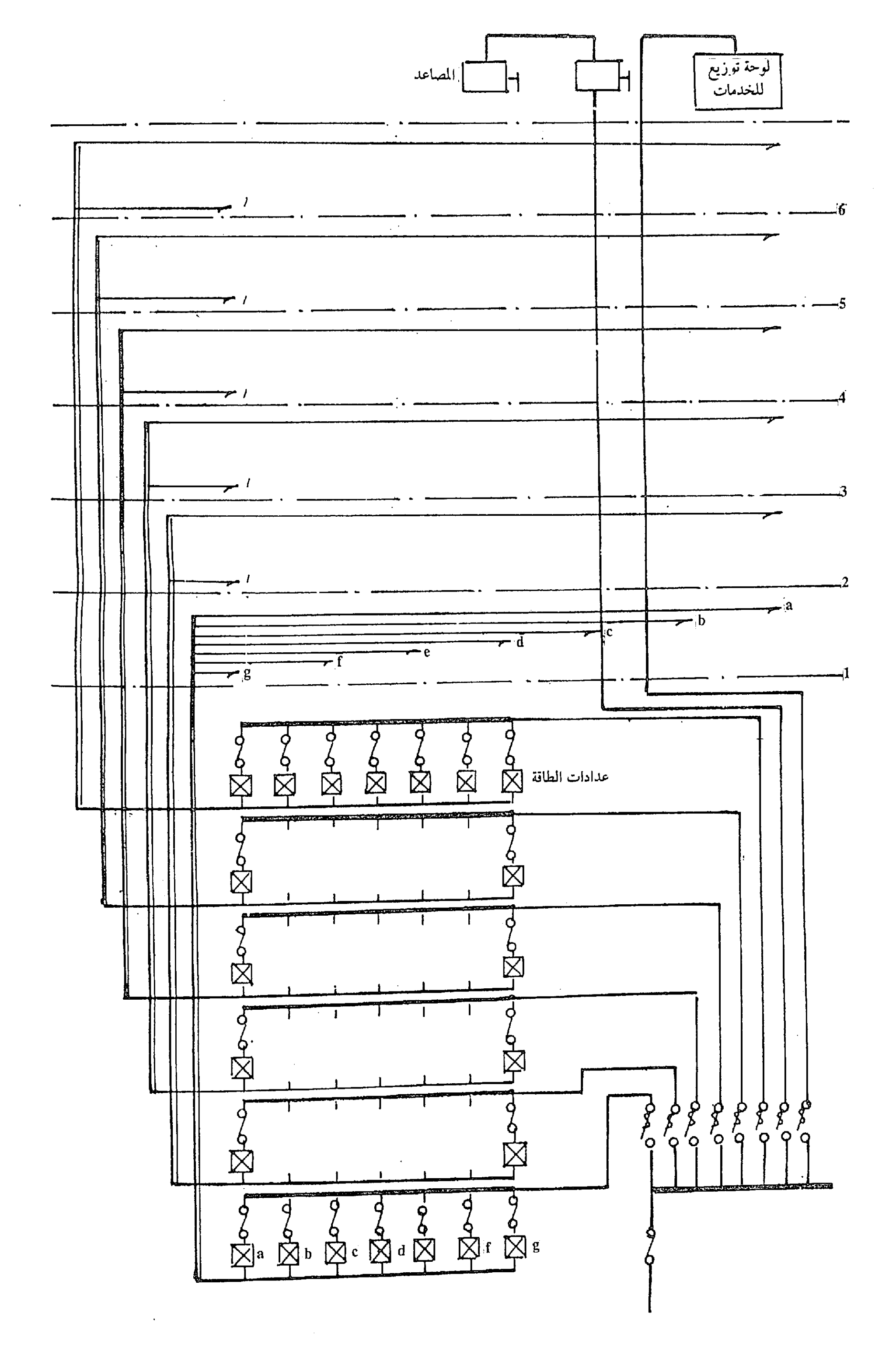
ويجب أن تراعي الشروط المحلية عند عمل التمديدات الكهربية

ويوضع عداد الاستهلاك الكهربائي في المشروعات الكبيرة على لوحة التوزيع العمومية لحساب الاستهلاك الكلي للمشروع .

أما في المباني السكنية فكان المتبع وضع عدادات الاستهلاك الكهربائي في الوحدات السكنية مما كان يعوق عمل الموظف المختص بقراءة العدادات وقد طورت هذه الطريقة إلى تجميع عدادات كل طابق بالردهة بكل طابق خارج الوحدات السكنية أو بتجميع جميع العدادات في مكان واحد بأسفل المبنى . ويبين الشكل رقم (٤ ـ ٢) والشكل رقم (٤ ـ ٣) نماذج لتخطيط أحادي الخط لمسار التيار لكل من الطريقتين مطبقة في مبنى متعدد الطوابق .



شكل رقم (٤ ـ ٢) نموذج لتخطيط أحادي الخط لمسار التيار



شكل رقم (٤ ـ ٣) نموذج لتخطيط أحادي لمسار التيار مع عدادات الطاقة مجمعة .

ويتبين من الشكل رقم (٤ - ٢) أن كابل التغذية العمومي يدخل إلى لوحة توزيع عمومية بها دائرة دخول وأربعة دوائر خروج الأول منها احتياطي والثاني لتغذية الخدمات والثالث لتغذية المصاعد وتكون عادة موجودة على السطح ، والرابع لتغذية اللوحة الرئيسية للأحمال التي يخرج منها خطوط صاعدة بمعدل خط لكل طابق يتصل بصندوق توزيع يوصل منه للعدادات . ويمكن وضع العدادات في الوحدات السكنية أو بردهة الطابق خارج الوحدات السكنية حسب الطلب . ويوضع صندوق معدني محكم الاغلاق يحوي مصهرين قبل كل عداد لحماية الخط من أي تلف محتمل ابتداءاً من العداد لوحدة معينة .

ويمكن تطوير هذه الطريقة كما هو مبين بشكل (٤ - ٣) حيث توضع جميع العدادات بغرفة بأسفل المبنى وعمل خطوط صاعدة من كل عداد وحتى الوحدة الخاصة به . وتتميز هذه الطريقة بأنها تسهل للموظف المختص أخذ قراءات العدادات في أي وقت .

٤ - ٣ عمل المخططات التنفيذية للتمديدات الكهربية الفرعية والرموز والمصطلحات المستخدمة فيها :

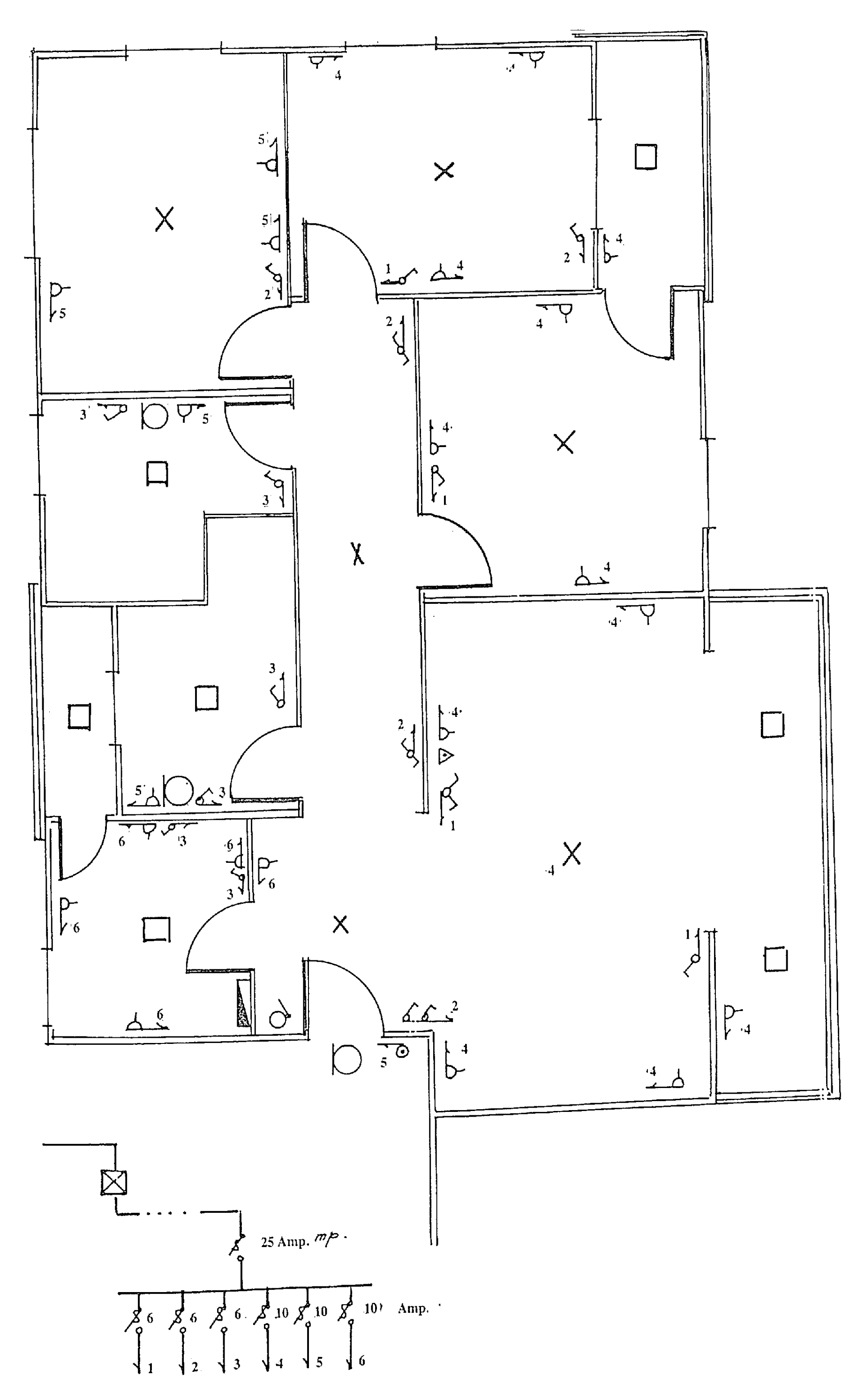
تمثل التمديدات الكهربية الفرعية الشبكة الداخلية الخاصة بتشغيل وحدات الإنارة وتغذية المقابس وباقي الأحمال بالمكان وتتكون هذه الشبكة من لوحة توزيع فرعية تغذي من خط من اللوحة الرئيسية لتوزيع الأحمال وتخرج منها خطوط تمثل الدوائر الكهربية للإنارة والمقابس ثم تتفرع منها دوائر نهائية للمفتاح أو المقبس .

ويمثل الجدول (٤ - ٤) الرموز والمصطلحات المستخدمة في رسم المخططات الخاصة بهذه التمديدات .

جدول رقم (٤ - ٤) الرموز والمصطلحات المستخدمة في مخططات التمديدات الكهربية

الرمز	البيان
$\times_n$	مخرج وحدة إنارة (عدد n لمبة)
	وحدة انارة بجلوب كروي (يذكر القطر)
	وحدة انارة ملصقة بالسقف بجلوب كروي / مربع
	وحدة انارة ملصقة بالحائط بجلوب كروي / مربع
	وحدة انارة فلورية بلمبة واحدة (يذكر الوات)
	وحدة إنارة فلورية بلمبتين
	مخرج كهربائي لمقبس مغذى من الدائرة الفرعية رقم (٢)
	مخرج كهربائي لمقبس ثلاثي الأوجه
	خط تغذية لدائرة أحادية الوجه
	خط تغذية لدائرة ثلاثية الوجه
	تغذية من الدائرة الفرعية رقم (٦)
	جرس رنان
	ضاغط جرس
	مفتاح سكة واحدة مغذى من دائرة رقم (٤)
	مفتاح سكتين
	مفتاح سلم
	لوحة توزيع فرعية
	ايريال تليفزيون
	ارضي

ولرسم مخطط لشبكة تمديدات كهربية يلزم عمل مسقط أفقي للمكان بمقياس رسم مناسب يبين فيه الأبواب والنوافذ ، كما يجب الحصول على رسم إنشائي للأسقف لمعرفة أماكن وجود الكمرات والخرسانات لعمل الاحتياطات اللازمة عند التصميم . وتقسم الأحمال إلى عدة أقسام يحكم كل منها دائرة تغذية واحدة تنتهي عند اللوحة الفرعية بمصهر أحادي على الخط المكهرب ، بينما يمر الخط المؤرض مباشرة إلى الحمل . وتكون دائرة التغذية للإنارة من خط من أسلاك نحاسية معزولة مقطعها ٢ مم٢ بداخل مواسير معدنية أو بلاستيكية مدفونة داخل الحائط أو مثبتة على وجه الحائط حسب نوعية المبنى كما سبق شرحه . اما دوائر تغذية المقابس فتكون من موصلات نحاسية معزولة بمقطع ٤ مم٢ بداخل مواسير معدنية أو بلاستيكية . ويمر الخط لكل دائرة بجميع الأماكن التي ستغذي منه ، كما يوضع عند كل نقطة تغذية علبة توصيل تدفن في الحائط وهي علبة مستديرة أو مربعة مصنوعة من المعدن وتبطن بورق عازل أو من الخشب أو من البلاستيك ، ويكون لها في جميع الأحوال غطاء يسهل نزعة عند اللزوم . كما يدفن في الحائط في المكان المخصص للمفتاح أو للمقبس علبة مماثلة ولكن بها أماكن يثبت فيها المفتاح أو المقبس ويغطي كل منهما بالغطاء الخاص به . ويبين الشكل رقم (٤ ـ ٤) مسقط أفقي لوحدة سكنية مبين عليه مخطط للشبكة . ويلاحظ هنا ترقيم الدوائر حسب المصهرات الخاصة بها على اللوحة الفرعية ، كما يرمز الرقم بجوار كل مفتاح أو مقبس إلى الدائرة المغذية لهذا المفتاح أو المقبس .



شكل رقم (٤ - ٤) مخطط للتمديدات الكهربية الفرعية بوحدة سكنية

الباب الخامس

الإضاءة الاصطناعية

٥ ـ ١ مقدمة :

تنقسم الإضاءة إلى نوعين :

١ ـ الإضاءة الطبيعية ـ وهي الإضاءة بضوء النهار الذي يعتبر المرجع والضوء المثالي الذي نحاول أن نقلده بالضوء الاصطناعي .

٢ ـ الإضاءة الاصطناعية ـ وهي الإضاءة بالمصادر الضوئية بأنواعها المختلفة للحصول على ضوء يشابه ضوء النهار بقدر الامكان .

ويجب أن يتوفر في الضوء الاصطناعي الشروط الآتية :

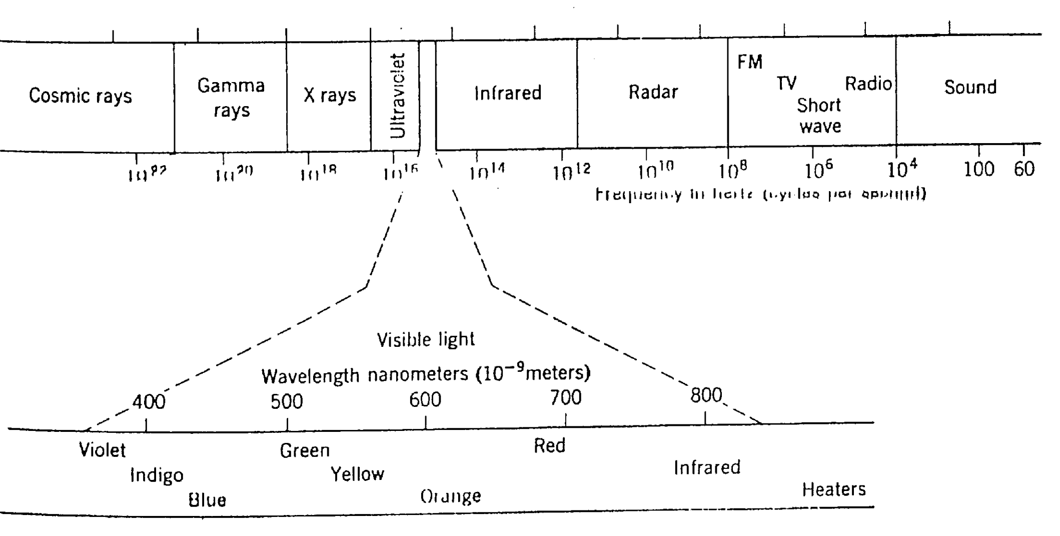
(أ) أن يكون مستوى الإضاءة بالمكان ذا مستوى متجانس ومناسب للعمل المطلوب تأديته بهذا المكان . فمستوى الإضاءة المطلوب في منزل غير المطلوب في مطعم أو فصل دراسي أو مكتب هندسي أو ورشة وما إلى ذلك .

(ب) أن يكون لون الضوء الاصطناعي مناسباً بحيث لا يؤثر على رؤ ية الألوان الموجودة والتي تكون مهمة في بعض الأحوال مثل محلات الأقمشة أو المطاعم أو معارض اللوحات الملونة بينما قد لا يكون مهماً في بعض الحالات الأخرى مثل فصول الدراسة أو المكاتب بأنواعها حيث يسبق ارتفاع مستوى الاضاءة في الأهمية الاهتمام بألوان الأشياء في المكان .

(جـ) تلافي وجود ظلال تسبب تفاوتاً كبيراً في مستويات الإضاءة بين الظل والنور وبين الأماكن المختلفة في الغرفة الواحدة . بينما يلزم وجود الظلال للحصول على رؤية مجسمة للأشياء في بعض الأحوال مثل معارض فن النحت والتماثيل مثلاً .

(د) تلافي وجود أجسام ساطعة في مدى البصر مما يؤدي إلى إبهار العين بتلك الأجسام وينتج عن ذلك سوء الرؤية وعدم المقدرة على التركيز .

٥ ـ ٢ طبيعة الضوء :



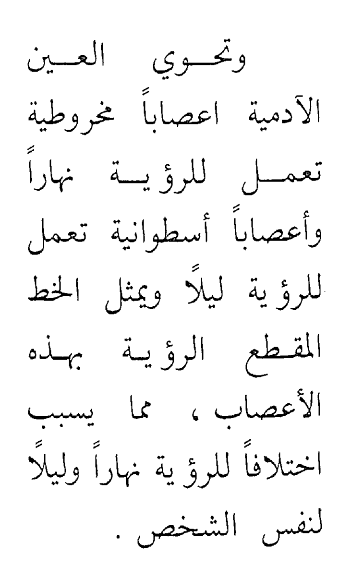
شكل رقم (٥ ـ ١)

يبين الشكل رقم (٥ ـ ١) طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي ويتبين منه أن نوع الاشعاع يتغير بتغير طول الموجة (λ) وبالتالي التردد ($\propto$) حيث تربط بينهما العلاقة :

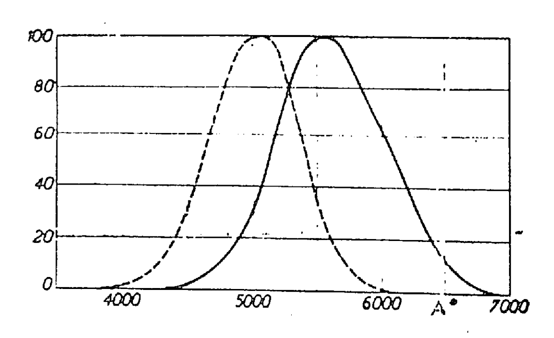
التردد × طول الموجة = سرعة الضوء

$\propto \times \lambda$ = ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر في الثانية .

ويتفاوت تأثير الاشعاع بتغير طول الموجة من موجات الاشعاعات الكونية إلى موجات اشعاع جاما إلى أشعة اكس ثم الأشعة فوق البنفسجية ثم الأشعة الضوئية (المرئية) ثم الأشعة تحت الحمراء ثم الموجات الكهرومغناطيسية متناهية القصر التي تستخدم في الرادار ثم الموجات المستخدمة في التليفزيون ثم الموجات القصيرة والمتوسطة والطويلة المستخدمة في الراديو وهكذا . وفي مدى الاشعاعات المرئية نجد أن لون الضوء الناتج يتغير بتغير طول الموجة من البنفسجي إلى الأزرق إلى الأخضر فالأصفر والبرتقالي ثم الأحمر ومدى هذه الاشعاعات يقع بين الموجات التي طولها ٣٨٠ مللي ميكرون (نانومتر) إلى ٧٤٠ مللي ميكرون. وتتغير الحساسية النسبية للعين الآدمية بالنسبة لأطوال الموجات وبالتالي للألوان الناتجة عنها حسب المنحنى المبين في شكل (٥ - ٢) حيث نجد أن أقل حساسية تكون للونين البنفسجي والأحمر بينما ترتفع الحساسية للألوان الأصفر والبرتقالي مما يجعلها ألوان مميزة تجتذب النظر وتستخدم لهذا الغرض في الاعلانات كما تستخدم في الاضاءة بالطرق السريعة مثلاً حيث يساعد الضوء بهذه الألوان على ارتفاع القدرة على التمييز عند السائق .



وتحوي العين الآدمية اعصاباً مخروطية تعمل للرؤية نهاراً وأعصاباً أسطوانية تعمل للرؤية ليلاً ويمثل الخط المقطع الرؤية بهذه الأعصاب ، مما يسبب اختلافاً للرؤية نهاراً وليلاً لنفس الشخص .



شكل رقم (٥ - ٢)

٥ ـ ٣ تعاريف الكميات الضوئية ووحداتها :

(أ) الفيض الضوئي : Luminous Flux (∅) :

هو عبارة عن كمية الضوء المنبعث من مصدر ضوئي في الثانية وفي جميع الاتجاهات .

ووحدة الفيض الضوئي هي اللومن Lumen .

وكمية الضوء المنبعث من المصدر الضوئي في زمن معين .

= الفيض الضوئي × الزمن بالثانية لومن ثانية .

أو = الفيض الضوئي × الزمن بالساعة لومن ساعة .

(ب) شدة الإضاءة : Illumination (E) :

وهي عبارة عن معدل توزيع الفيض الضوئي على السطح المضاء :

$$E = \frac{\varnothing}{A}$$

حيث A مساحة السطح المضاء بالمتر المربع .

ووحدة شدة الإضاءة هي معدل توزيع لومن واحد على وحدة المساحة .

قدم شمعة foot candle (ft cd) $= 1\ lm / sq.ft$

لوكس Lux $= 1\ lm / sq.\ meter$

$$1\ ft\ cd \cong 10\ Lux$$

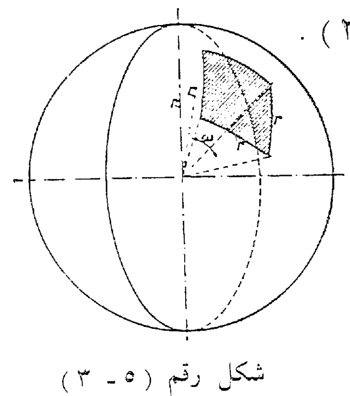
(جـ) شدة الإستضاءة : Luminous Intensity (I) :

وهي عبارة عن كمية الضوء المنبعث من مصدر ضوئي من خلال زاوية

مجسمة قدرها (ω) .

$$I = \frac{\varnothing}{\omega} \quad \text{candle}$$

ووحدة شدة الاستضاءة هي الشمعة (candle power) والزاوية المجسمة (solid angle) شكل رقم (٥ - ٣) .



شكل رقم (٥ - ٣)

هي عبارة عن الزاوية عند مركز كرة نصف قطرها (r) والتي تقابل مساحة معينة (A) على سطح الكرة .

$$\omega = \frac{A}{r^2}$$

ووحدة الزاوية المجسمة هي الزاوية التي تقابل مساحة قدرها r^2 وبالتعويض عن (ω) نجد أن :

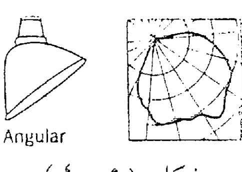
$$I = \frac{\varnothing}{\omega} = \frac{\varnothing}{A} \cdot r^2 = E . r^2$$

أي أن :

$$E = \frac{I}{r^2}$$

وهذا هو قانون التربيع العكسي للضوء والذي ينص على أن « شدة الاضاءة الناتجة عن مصدر معين في اتجاه محدد تتناسب عكسياً مع مربع المسافة إلى المصدر في نفس الاتجاه » .

وتختلف شدة استضاءة مصدر ضوئي حسب زاوية النظر للمصدر شكل رقم (٥ - ٤) . ويمكن أخذ قيمة متوسطة متساوية لجميع الزوايا وتحسب لذلك الزاوية المجسمة المقابلة لسطح الكرة بأكمله حيث :



شكل (٥ - ٤)

$$A = 4 \pi r^2$$

وتكون :

$$\omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi$$

وتسمى شدة الاستضاءة في هذه الحالة بالقيمة المتوسطة الكروية :

Mean spherical candle power (M.S.C.P.)

$$I_{M.S.C.P.} = \frac{\varnothing}{4\pi} \quad cd$$

ويمكن عن طريق هذه العلاقة حساب الفيض الضوئي للمصدر :

$$\varnothing = I_{M.S.C.P.} \times 4\pi \quad Lumen$$

(د) السطوع : **Brightness. (B)** :

والسطوع اما أن يكون ناتجاً عن مصدر ضوئي أو عن انعكاس من سطح لامع ويحسب في كل حالة كالآتي :

السطوع الناتج عن مصدر ضوئي هو كثافة شدة الاستضاءة المنبعثة من المصدر في مدى البصر فإذا كانت مساحة الجزء المضيء من المصدر A فإن :

$$B_{source} = \frac{I}{A}$$

والسطوع الناتج عن الانعكاس من سطح لامع يساوي شدة الاضاءة المنعكسة من السطح في مدى البصر . فإذا كان معامل انعكاس السطح (R) فإن :

$$B_{surface} = R.\ E_{surface}$$

ووحدات السطوع هي :

$$1\ \text{stilb (sb)} = 1\ cd/sq.cm \qquad 1\ \text{Nit} = 1\ cd/sq.m$$

$$1\ \text{apostilb (asb)} = \frac{Nit}{\pi} = \frac{10^{-4}}{\pi}\ \text{stilb}$$

$$1\text{- sb} = 10^4\ \text{Nit} = \pi.\ 10^4\ \text{asb.}$$

ويبين الشكل رقم (٥ ـ ٥) مستويات السطوع للمصادر الضوئية المختلفة .



شكل رقم (٥ - ٥)
مستويات السطوع
للمصادر الضوئية المختلفة

٥ - ٤ حسابات الإضاءة الداخلية بالمباني :

تحسب الإضاءة الداخلية بالمباني على أحد النظامين الآتيين :

(أ) اضاءة عامة فقط لكل المكان .

(ب) اضاءة عامة بالمكان بالإضافة إلى إضاءة مركزة على أماكن العمل .

والنظام الأول هو المستخدم عموماً إذا كان مستوى الإضاءة المطلوب مناسباً أي غير مرتفع جداً ، حيث أن اضاءة المكان كله بهذا المستوى ستكون باهظة التكاليف، وفي هذه الحالة يستخدم النظام الثاني حيث يضاء المكان بمستوى متوسط وتضاء أماكن العمل بأضواء مركزة بمستوى مرتفع مناسب للعمل الذي يؤدي بهذه الأماكن .

ويختار مستوى الإضاءة في أي من النظامين حسب الجداول الآتية :

مستوى الاضاءة	إضاءة عامة فقط (lux)	إضاءة عامة + إضاءة مركزة	
		مركزة (lux)	عامة
Very poor	30	——	——
poor	60	——	——
medium	120	250	20
high	250	500	40
very high	600	1000	80
extra ordinary	——	4000	300

ويبين الجدول التالي بعض الاستخدامات لهذه المستويات .

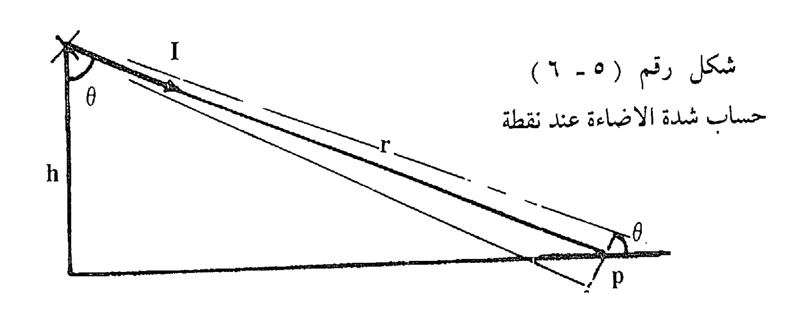
وبعد اختيار مستوى الإضاءة المناسب يتم حساب وحدات الإضاءة اللازمة لتوفير هذا المستوى وتستخدم لذلك الطرق الآتية :

(أ) حساب الإضاءة العامة في مكان مساحته (A) حيث يحسب الفيض الضوئي (∅) اللازم لتوفير مستوى اضاءة قدره (E) على النحو التالي :

$$\varnothing = E.A \quad \text{lumens}$$

(ب) حساب الإضاءة على نقطة معينة .

فالإضاءة عند النقطة (P) تحسب من الشكل رقم (٥ ـ ٦) على النحو التالي :



شكل رقم (٥ ـ ٦)
حساب شدة الاضاءة عند نقطة

very poor	poor	medium	high	very high	extra ordinary
house halls side rooms store rooms toilets	stairs stores glass fixing iron casting rolling metals drawing metals forging metals garages kitchens hospitals	moulding spray casting metal turning metal pressing metal punching sawing wood planning metal milling sport halls music halls mech. labs shops selling light articles	assembling polishing spinning painting sewing printing office work reading instr. class rooms drawing shops selling dark articles	fein mechanics optical glass assembling techn. drawing colour testing exam. rooms in hospitals. laboratories pharmacies	sculpture etching gold works Jewlery operation rooms
		hand work	control and revision.		

$$E_p = \frac{I}{r^2} \cos\theta$$

$$\text{but} \quad r = \frac{h}{\cos\theta}$$

$$\therefore \quad E_p = \frac{I}{h^2} \cdot \cos^3\theta$$

حيث (h) ارتفاع المصدر الضوئي عن مستوى النقطة ،

(r) المسافة بين المصدر والنقطة .

العوامل المؤثرة على حسابات الإضاءة :

عند حساب الإضاءة يجب الأخذ في الاعتبار لعدة عوامل مؤثرة ومن أهمها :

(أ) معاملات الصيانة والاستخدام وكفاية الاضاءة .

(ب) طريقة الإضاءة .

(جـ) نوع العواكس المستخدمة .

(د) معاملات الانعكاس لأسطح الغرفة .

(هـ) معامل الغرفة وكفاية الإضاءة .

وفيما يلي توضيح لتأثير كل من هذه العوامل على الحسابات .

(أ) معاملات الصيانة والاستخدام .

معامل الصيانة (M) Maintenance Factor :

يمثل هذا المعامل مقدار الفقد الناتج عن معدل الصيانة من حيث

التنظيف الدوري للوحدات وتغيير المصابيح عند انقضاء عمرها الافتراضي أو عند تلفها . وقيمة هذا لمعامل أقل من واحد ويقل كلما كانت الصيانة رديئة .

معامل الاستخدام **Utilization Factor (U)** :

يمثل هذا المعامل نسبة ما يصل من الضوء إلى مستوى العمل . إلى الضوء الكلي المنبعث من وحدات الإضاءة وهو أقل من الواحد وتتوقف قيمته على نوع وحدات الإضاءة المستخدمة .

وباحتساب هذين المعاملين تصبح العلاقة .

$$E = \frac{\emptyset}{A} .M.U \quad \text{lux}$$

أو أن :

$$\emptyset = \frac{E.A}{M.U} \quad \text{lume lumen}$$

(ب) طريقة الإضاءة ونوع الوحدات :

توجد عدة طرق للإضاءة الداخلية يستخدم لكل منها وحدات اضاءة مناسبة ويختار منها الطريقة المناسبة للمكان المطلوب إضاءته :

الإضاءة المباشرة : **Direct Lighting** :

وتكون هذه الإضاءة بوحدات تعطي ٩٠٪ من الضوء على المساحة المضاءة بينما ١٠٪ على الأكثر مرتد للسقف .

الإضاءة نصف المباشرة : **Semi Direct** :

ويكون هنا ٦٠٪ من الضوء ساقطاً على المساحة المضاءة بينما ٤٠٪ على الأكثر متجها نحو السقف .

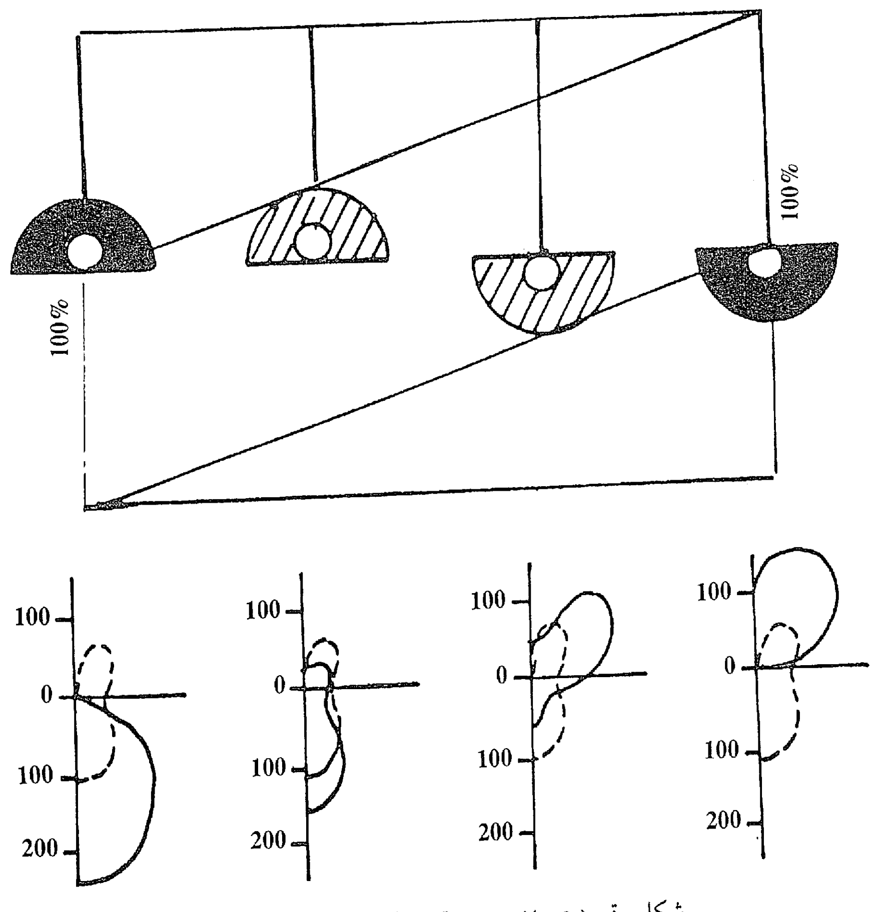
الإضاءة نصف الغير مباشرة : Semi Indirect :

ويكون هنا ٤٠٪ من الضوء متجها نحو المساحة المضاءة بينما ٦٠٪ متجها نحو السقف .

الإضاءة غير المباشرة : Indirect Lighting :

ويكون هنا ١٠٪ من الضوء متجها نحو المساحة المضاءة بينما ٩٠٪ متجها نحو السقف .

ويبين الشكل رقم (٥ ـ ٧) رسماً تمثيلياً للطرق المختلفة مع منحنيات شدة الاستضاءة لها .



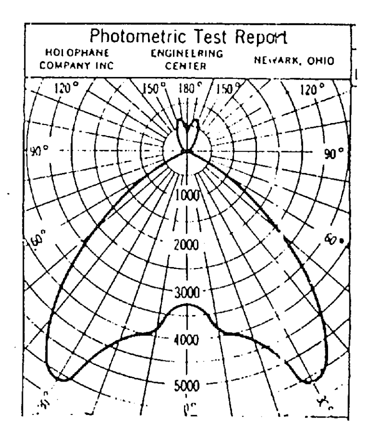
شكل رقم (٥ ـ ٧) رسم تمثيلي لطرق الإضاءة المختلفة

Types of Luminaires Used: **(جـ) نوع العواكس المستخدمة :**

الغرض من استخدام العاكس هو توجيه الضوء المنبعث من المصدر الضوئي ويصحب ذلك فقد في كمية من الفيض الضوئي الصادر من المصدر الضوئي . وتحدد قيمة العاكس بعاملين أساسين يمكن الحصول عليهما بعمل إختبار للعاكس في مختبر متخصص . وفي المعتاد تعطي نتائج هذه الاختبارات من الشركات المنتجة مع العواكس التي تنتجها . وهذان العاملين هما :

أولاً - منحنى توزيع شدة الاستضاءة :

Intensity Distribution Curve (I.D.C.):



شكل رقم (٥ - ٨)
منحنى شدة الاستضاءة لوحدة ضوئية

ويمثل هذا المنحنى شدة الاستضاءة من زوايا مختلفة (كل ٣٠ درجة مثلاً) في مستوى رأسي يقطع الوحدة . ويبين في الشكل رقم (٥ - ٨) منحنى شدة استضاءة العاكس بالمصباح . ويتضح من الشكل مدى التوجيه الذي يسببه العاكس . وقيمة شدة الاستضاءة هنا تكون نسبية حيث تفرض للقيمة القصوى مقدار ١٠٠٠ شمعة ثم تنسب باقي القيم لهذه القيمة .

ولإيجاد القيمة الحقيقية عند أي زاوية تضرب القيمة المبينة بالرسم في (القيمة القصوى الحقيقية ÷ ١٠٠٠) .

ويستفاد من هذا المنحنى في معرفة كيفية التوجيه الذي يجب أن يتفق مع الغرض المستخدم من أجله العاكس .

ثانياً ـ الكفاءة الضوئية للعاكس :

Luminaire Efficiency (ν):

وتعرف هذه الكفاءة بأنها النسبة بين الفيض الضوئي الناتج عن المصباح والعاكس إلى الفيض الضوئي المنبعث من المصباح وحده :

$$\nu = \frac{\varnothing \text{ (lamp + reflector)}}{\varnothing \text{ (lamp only)}}$$

وهو أقل من الواحد .

ويستفاد من هذه القيمة في معرفة الفقد الذي يحدث نتيجة لتوجيه الضوء بالشكل المطلوب .

(د) معاملات الانعكاس والنفاذ والامتصاص لأسطح الغرفة :

تؤثر طبيعة أسطح الغرفة تأثيراً كبيراً في حسابات الاضاءة عن طريق تعامل الضوء الساقط مع هذه الأسطح . ومن أهم هذه التأثيرات الانعكاس الذي يعتمد على نوع تشطيب السطح ولون الطلاء ودرجته ونوعه ويتبين ذلك من الجدول التالي لمعاملات الانعكاس لبعض الأسطح والألوان :

لون السطح	معامل الانعكاس (R%)
white, oil paint	80 – 85%
white, normal paint (new)	82 – 89%
white, normal paint (old)	75 – 85%
yellowish red	49 – 66%
ivory	73 – 78%
grey	17 – 63%
yellow	61 – 75%
yellowish brown	30 – 40%
light green	48 – 75%
dark green	11 – 25%
light blue	34 – 61%
light red	36 – 61%

ويقسم الضوء الساقط على سطح عموماً إلى ثلاثة أجزاء بنسب مختلفة ، جزء ينعكس وجزء يمتص وجزء ينفذ من السطح المضاء . ويمثل هذه الأجزاء معاملات ثلاث هي :

معامل الانعكاس : (R) Cœfficient of Reflection :

وهو النسبة بين الضوء المنعكس من السطح إلى الضوء الساقط عليه .

معامل النفاذ : (T) Cœfficient of Transmission :

وهو النسبة بين الضوء النافذ من السطح إلى الضوء الساقط عليه .

معامل الامتصاص : ($\propto$) Cœfficient of Absorbtion :

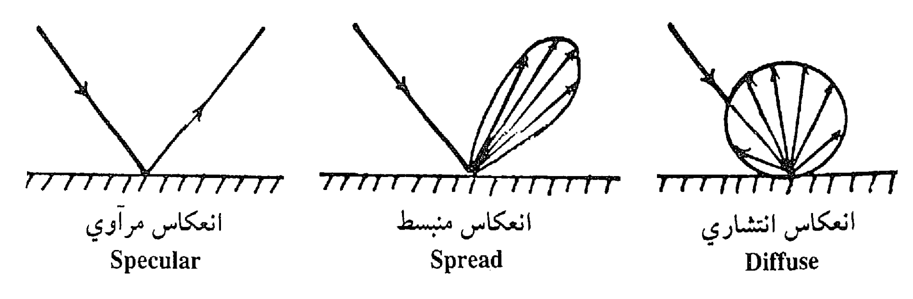
وهو النسبة بين الضوء الممتص بالسطح إلى الضوء الساقط عليه .

ويكون :

$$R + T + \propto = 1$$

ويمكن أن يكون واحد أو أكثر من هذه المعاملات يساوي صفر مثال ذلك سطح مصمت أسود حيث يكون $R = 0, \ T = 0$ أي أن $\propto = 100\%$. أي أن الضوء الساقط يمتص كله بالسطح .

ويكون الانعكاس بأشكال مختلفة تتوقف على طبيعة السطح المضاء ، وذلك على النحو المبين بشكل رقم (٥ - ٩) .

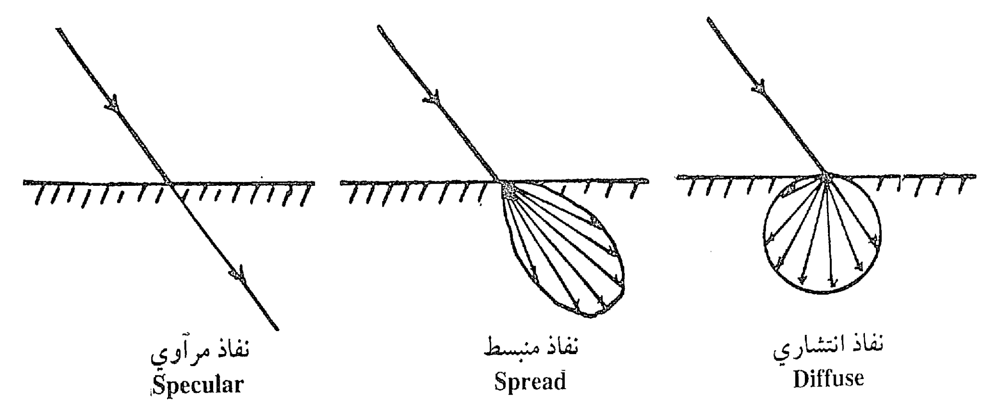


شكل رقم (٥ - ٩) أشكال الانعكاس من الأسطح المضيئة .

وينتج الانعكاس المرآوي عن الأسطح اللامعة كالمرايا ، والانعكاس المنبسط عن الأسطح المطلية بطلاء غير لامع ، والانعكاس المنتشر عن

الأسطح المطلية بطلاء انتشاري مثل المصيص . ويمكن أن تعطي بعض الأسطح انعكاساً يشمل نوعين أو ثلاثة من هذه الأشكال .

ويكون النفاذ بنفس الأشكال بناء على طبيعة الأسطح الساقط عليها الضوء على النحو المبين بالشكل رقم (٥ ـ ١٠) .



شكل رقم (٥ ـ ١٠) الأشكال المختلفة للنفاذ

ومثال للنفاذ المرآوي هو النفاذ الناتج عن زجاج شفاف ، وللنفاذ المنبسط هو النفاذ الناتج عن الزجاج المصنفر ، وللنفاذ الانتشاري هو النفاذ الناتج عن الزجاج الأوبال الأبيض .

(هـ) ابعاد الغرفة ـ معامل الغرفة : Room Factor (K) :

تؤثر ابعاد الغرفة على الكفاية الضوئية لعملية اضاءة . فمعامل الغرفة :

$$K = \frac{0.8\,W + 0.2L}{h_e}$$

حيث :

W = عرض الغرفة .

L = طول الغرفة .

h_e = الارتفاع الفعلي ويساوي المسافة بين المصدر الضوئي ومستوى العمل (٨٠ سم من سطح الأرض) .

ويمكن ايجاد الكفاية الضوئية (η) من الجداول التي تبين الكفاية الضوئية لكل معامل غرفة لأنواع الاضاءة المختلفة .

طريقة الإضاءة / طبيعة الأسطح	مباشر		نصف مباشر		نصف غير مباشر		غير مباشر	
	K	η	K	η	K	η	K	η
السقف فاتح ، والجدران متوسطة	1.0	0.3	1.0	0.17	0.6	0.14	0.6	0.12
	1.5	0.45	1.5	0.25	1.0	0.20	1.0	0.17
	2.5	0.55	2.5	0.33	1.5	0.27	1.5	0.23
	4.0	0.63	4.0	0.4	2.5	0.35	2.5	0.30
	8.0	0.7	8.0	0.53	5.0	0.46	5.0	0.40
السقف متوسط ، الجدران فاتحة .	1.0	0.22	1.0	0.09	0.6	0.07	0.6	0.07
	1.5	0.37	1.5	0.16	1.0	0.13	1.0	0.08
	2.5	0.50	2.5	0.23	1.5	0.17	1.5	0.12
	4.0	0.58	4.0	0.30	2.5	0.24	2.5	0.18
	8.0	0.66	8.0	0.40	5.0	0.33	5.0	0.25

وبعد إيجاد قيمة الكفاية الضوئية (η) يمكن حساب الفيض الضوئي :

$$\varnothing = \frac{E.A}{\eta} \quad \text{lumens}$$

وتمثل الكفاية الضوئية النسبة بين الضوء الذي يصل إلى المستوى المضاء والضوء المنبعث من وحدات الاضاءة بالمكان .

المسافات بين وحدات الاضاءة :

يراعي في توزيع وحدات الإضاءة بسقف المكان أن تعطي توزيعاً متجانساً للضوء وهي تتبع لذلك القواعد الآتية :

أولاً ـ أن تكون المسافة بين كل وحدتين مساوية للارتفاع بين الوحدات ومستوى العمل .

ثانياً ـ أن تترك بين الصف الأخير والحائط مسافة تساوي نصف المسافة بين الوحدتين إذا كان توزيع الأثاث بالغرفة طبيعي ، بينما تترك مسافة تساوي ($\frac{١}{٣}$ - $\frac{١}{٤}$) المسافة بين الوحدتين إذا كان توزيع الأثاث بحيث توضع مناضد أو مكاتب بجوار الحائط .

٥ ـ ٦ أمثلة محلولة :

مثال ٥ : ١ :

ورشة نجارة أبعادها ٢٤ م × ١٢ م وارتفاعها ٤ متر . سقفها من الخرسانة بمعامل انعكاس ٥٠٪ . وكان لون الحوائط رمادي فاتح بمعامل انعكاس ٣٠٪ . والمطلوب اضاءة المكان مع تحقيق الرغبات الآتية : استخدام مصابيح عادية (ذات الفتيلة) ، أن تكون الإضاءة مباشرة ، ألا تقل جودة العواكس عن ٧٥٪ وأن تعلق العواكس على بعد ٤٠ سم من السقف ، أن تحقق اضاءة متجانسة قدرها ١٥٠ لوكس .

الارتفاع الفعال h_c = ٤ - ٠,٨ - ٠,٤ = ٢,٨ متر .

$$\text{معامل الغرفة } K = \frac{٢٤ \times ٠,٢ + ١٢ \times ٠,٨}{٢,٨} = ٥,١٥$$

باعتبار السقف متوسطة والجدران فاتحة وبمعامل غرفة ٥,١٥ .

نجد من الجدول أن جودة الاضاءة (η) $\cong$ ٠,٥٨

باستخدام وحدات اضاءة ذات جودة = ٠,٧٥

وبذلك يمكن حساب الفيض الضوئي الواجب توفره .

الفيض الضوئي المطلوب $\varnothing$ = $\frac{١٥٠ \times ١٢ \times ٢٤}{٠,٥٨ \times ٠,٧٥}$ = ٩٩٣١٠ لومن

وبإضـاءة مباشرة فإن النسبة بين البعد بين الوحدات (a) إلى ارتفاع الواحدات عن مستوى العمل (h_e) تكون :

$$\frac{a}{h_e} = 1$$

أي أن المسافة بين الوحدات $a = h_e =$ ٢,٨ متر .

وبهذا يكون عدد الصفوف بعرض القاعة = ١٢ ÷ ٢,٨ ≅ ٤ صفوف .

ويكون عدد الصفوف بطول القاعة = ٢٤ ÷ ٢,٨ ≅ ٨ صفوف .

أي أنه للحصول على اضاءة متجانسة يلزم ٤ × ٨ = ٣٢ وحدة انارة موزعة على صفوف ٨ × ٤ .

ويكون الفيض الضوئي لكل وحدة = ٩٩٣١٠ ÷ ٣٢ = ٣١٠٣ لومن .

وحيث أن المصباح الكهربائي قدرة ٢٠٠ وات بجهد ٢٢٠ فولت يعطي ٢٨٠٠ لومن فإنه يصلح للغرض وتزود به الوحدات المطلوبة .

القدرة الكلية للوحدات = ٢٠٠ × ٣٢ = ٦٤٠٠ وات

وتكون الجودة الكلية = ٩٩٣١٠ ÷ ٦٤٠٠ = ١٥,٥٠ لومن / وات .

المعدل الكهربائي للإضاءة = ٦٤٠٠ ÷ (٢٤ × ١٢) = ٢٢,٢٢ وات / م^{٢} .

مثال ٥ : ٢ :

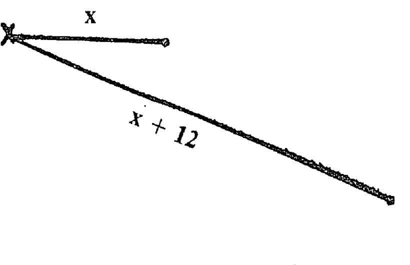
مصدر ضوئي يعطي إضاءة قدرها ١٠٠ قدم شمعة على بعد قدره (X)

قدم من المصدر كما يعطي إضاءة قدرها ١ قدم شمعة على مسافة قدرها (X + ٣٦) قدم من المصدر . أوجد قيمة المسافتين وأوجد شدة الاستضاءة للمصدر .

وإذا كان للمصدر نفس شدة الاستضاءة في جميع الاتجاهات فأوجد الفيض الضوئي الصادر منه . ثم احسب شدة الاضاءة التي يمكن الحصول عليها عند نقطة إذا استخدم هذا المصدر على ارتفاع قدره ١٤ قدم وعلى بعد قدره ٢٥ قدم من النقطة .

$E_1 = \frac{I}{X^2} = ١٠٠$ قدم شمعة

$E_2 = \frac{I}{(X + ٣٦)^٢} = ١$ قدم شمعة



شكل رقم (٥ - ١١)

$١٠٠ X^٢ = (X + ٣٦)^٢$ أي أن : $X = ٤$ قدم .

والمسافة الأخرى $(X + ٣٦) = ٤٠$ قدم .

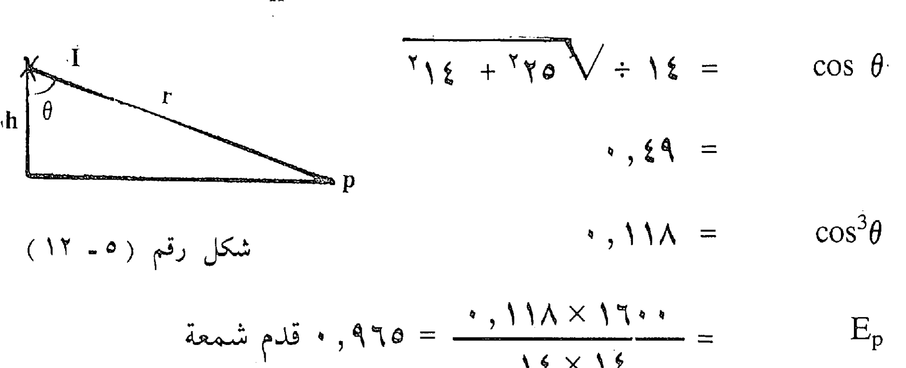
شدة الاستضاءة للمصدر $I = E.X^2 = ١٦٠٠$ شمعة .

باعتبار شدة استضاءة المصدر متساوية في جميع الاتجاهات .

فإن الفيض الضوئي للمصدر $\varnothing = 4\pi I$

= ٤ × ٣,١٤ × ١٦٠٠ = ٢٠١٠٠ لومن

شدة الاضاءة عند النقطة $P = \frac{I}{h^2} . \cos^3 \theta$



$\cos \theta = ١٤ \div \sqrt{٢٥^{٢} + ١٤^{٢}}$

$= ٠,٤٩$

$\cos^3\theta = ٠,١١٨$

شكل رقم (٥ - ١٢)

$E_p = \frac{٠,١١٨ \times ١٦٠٠}{١٤ \times ١٤} = ٠,٩٦٥$ قدم شمعة

مثال ٥ : ٣ :

استخدمت وحدة اضاءة لانارة طريق وكانت شدة استضاءة الوحدة ٦٠٠ شمعة وارتفاعها فوق سطح الطريق ٢٧ قدم ارسم منحنى يبين توزيع شدة الاضاءة على مستوى الطريق لهذه الوحدة حتى بعد ٦٠ قدم من قاعدتها .

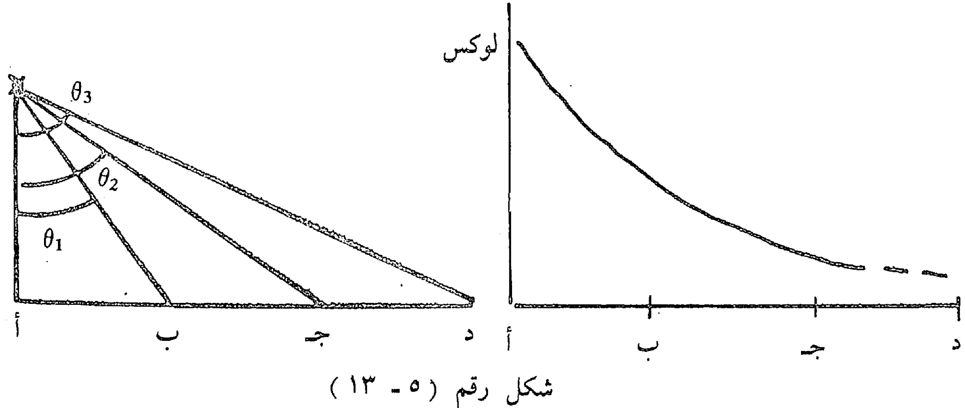
عند كل من النقط أ ، ب ، جـ ، د شكل (٥ - ١٣) ،

تكون شدة الإضاءة $E = \frac{I}{h^2} \cos^3\theta$

حيث $h =$ ٢٧ قدم

، $I =$ ٦٠٠ شمعة

النقطة	$\tan\theta$	θ	$\cos\theta$	$\cos^3\theta$	E
أ	٠	٠	١	١	٠,٨٢٣
ب	$\frac{٢٠}{٢٧}$	٣٦,٥	٠,٨	٠,٥٢	٠,٤٣
جـ	$\frac{٤٠}{٢٧}$	٥٦	٠,٥٦	٠,١٨	٠,١٥
د	$\frac{٦٠}{٢٧}$	٦٥,٨	٠,٤	٠,٠٦	٠,٠٥٧



شكل رقم (٥ - ١٣)

مثال ٥ : ٤ :

مصباح من النوع ذو الفتيلة له متوسط شدة اضاءة كروية (MSCP) ٢٥٠ شمعة ، وضع على ارتفاع ١٦ قدم من مستوى العمل في عاكس يعطي فيضاً ضوئياً موزعاً بانتظام في دائرة قطرها ١٦ قدم على مستوى العمل . فإذا كان هذا العاكس يرسل ٠,٤٥ من ضوء المصباح إلى هذه الدائرة فأوجد متوسط شدة الاضاءة على مستوى العمل . احسب شدة الاضاءة عند محيط الدائرة إذا رفع العاكس عن المصباح .

الفيض الضوئي للمصباح = MSCP × ٤ π

= ٢٥٠ × ٤ π = ١٠٠٠ π لومن

الفيض الضوئي المنبعث
من العاكس = ١٠٠٠ π × ٠,٤٥ = ٤٥٠ π لومن

شدة الإضاءة المتوسطة = $\frac{\text{٤٥٠}\ \pi}{\pi \times \text{٨}^{\text{٢}}}$ = ٧ قدم شمعة

إذا رفع العاكس فإن شدة الاضاءة عند محيط الدائرة يحسب على النحو التالي :

$$E = \frac{I}{d^2} \cdot \cos\theta$$

$$I = 250 \text{ candle}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{8}{16} = 26.5^\circ$$

$$\cos\theta = 0.895$$

$$d = \sqrt{16^2 + 8^2} = \sqrt{320}$$

$$\therefore E = \frac{250}{320} \times 0.895$$

$$= 0.7 \text{ ft candle}$$

٥ ـ ٦ الإضاءة بالوحدات الكاشفة :

يستخدم هذا النوع من الوحدات لإضاءة الواجهات أو الأماكن المطلوب فيها تركيز الاضاءة وتعطي شعاع ضوئي بعيد المدى . وتكون عبارة عن مصباح في كشاف لامع (مرآة) .

فإذا كان توهج المصباح B (Nit)

وكان معامل الانعكاس لسطح العاكس R

ومساحة فتحة العاكس التي يخرج منها الضوء $A\ (m^2)$

فإن شدة الاستضاءة للعاكس تكون :

$$I = A.B.R \quad \text{candle}$$

وتكون شدة الاضاءة الناتجة عن هذا العاكس على بعد قدره d متر .

$$E = \frac{I}{d^2}$$

مثال ٥ : ٥

عاكس برابولي (على شكل قطع مكافئ) ذو فتحة قطرها ٣٠ سم .

مضاء بواسطة مصباح عند البؤرة له توهج ١٠٣,١٥ شمعة / مم^{٢} .

فإذا كان معامل انعكاس سطح العاكس ٠,٨ فاحسب أقصى شدة استضاءة للعاكس . وكذلك أقصى اضاءة يمكن الحصول عليها من هذا العاكس وعلى مسافات كل منها ٢٥٠ متر حتى بعد ١ كيلومتر .

مساحة فتحة العاكس (A) = π × ١٥٠^{٢} = ٧٠٦٥٠ ملليمتر مربع .

شدة الاستضاءة القصوى = A × B × R .

= ٧٠٦٥٠ × ١٠٣,١٥ × ٠,٨

= ٥٨٣٠٠٠٠ شمعة

شدة الاضاءة القصوى = $E = \frac{I_m}{d^2}$

d	d^2	E_m
٢٥٠ متر	٦٢٥٠٠	٩٣,٢٨ لوكس
٥٠٠ متر	٢٥٠٠٠٠	٢٣,٣٢ لوكس
٧٥٠ متر	٥٦٢٥٠٠	١٠,٣٦ لوكس
١٠٠٠ متر	١٠٠٠٠٠٠	٥,٨٣ لوكس

مثال ٥ : ٦ :

جهاز عرض سينمائي يعطي صورة أبعادها ٣ متر × ٢ متر فإذا كانت القيمة المتوسطة لاضاءة الشاشة ٢٠ لوكس .

(أ) أوجد الفيض الضوئي المنبعث من الجهاز مع احتساب فقد قدره ١٥٪ في المسافة بين الجهاز والشاشة .

(ب) إذا كان سطح الشاشة ذات لون أبيض بمعامل انعكاس قدره ٦٠٪ فأوجد متوسط توهج هذا السطح .

(جـ) إذا أريد الحصول على توهج على الشاشة قيمته ضعف القيمة المحسوبة في (ب) فأوجد أبعاد الشاشة في هذه الحالة .

(أ) مساحة شاشة العرض = ٣ × ٢ = ٦ م^{٢} .

الفيض الضوئي الساقط على شاشة العرض

= ٦ × ٢٠ = ١٢٠ لومن

باحتساب ١٥٪ فقد يكون الفيض الضوئي الخارج من جهاز العرض

= ١٢٠ ÷ ٠,٨٥ = ١٤٢ لومن

(ب) التوهج على شاشة العرض = ٢٠ × ٠,٦ = ١٢ نيت

(جـ) للحصول على ضعف قيمة التوهج على شاشة العرض أي ٢٤ نيت .

فإن شدة الاضاءة (E) = ٢٤ ÷ ٠,٦ = ٤٠ لوكس

وتكون مساحة الشاشة $= \frac{\varnothing}{E} = \frac{١٤٢}{٤٠} =$ ٣,٥٥ متر مربع

أي حوالي ٢,٣ متر × ١,٥٤ متر

إذا احتفظنا بنفس نسبة أبعاد الشاشة على النحو التالي :

$$\text{النسبة بين المساحتين} = \frac{٦}{٣,٥٥} = ١,٧ = ١,٣^{٢}$$

$$\text{فتكون الأبعاد} = \frac{٣}{١,٣} \times \frac{٢}{١,٣} = ٣,٥٥ \text{ م}^{٢}$$

$$= ٢,٣ \times ١,٥٤ \text{ متر مربع}$$

مثال ٥ : ٧

أوجد عدد الوحدات الكاشفة قوة ١٠٠٠ وات اللازمة لاضاءة مساحة ارتفاعها ٢٥٠ قدم تمثل الجزء العلوي من واجهة برج ارتفاعه ٣٢٠ قدم وعرضه ٤٣ قدم بشرط ألا تزيد شدة التوهج عن ٢ قدم لامبرت . هذا وتوضع الكشافات على مستوى الأرض وعلى بعد ١٧٠ قدم . مع احتساب الآتي :

جودة الوحدات الكاشفة ٠,٢ ، معامل انعكاس سطح المبنى ٠,٢٥ ، الفيض الضوئي لكل وحدة ١٨٠٠٠ لومن .

المساحة المضاءة = ٢٥٠ × ٤٣ = ١٠٧٥٠ قدم مربع

شدة التوهج B = ٢ قدم لامبرت = ٢ لومن / قدم مربع .

معامل الانعكاس R = ٠,٢٥

$$\text{شدة الاضاءة للسطح} = \frac{B}{R} = \frac{٢}{٠,٢٥} = ٨ \text{ قدم شمعة}$$

الفيض الضوئي اللازم = $E \times A$.

= ١٠٧٥٠ × ٨ = ٨٦٠٠٠ لومن

وبجودة مقدارها ۰,۲ يكون الفيض الضوئي الذي يجب أن تعطيه الوحدة .

$$= \frac{٨٦٠٠٠}{٠,٢} = ٤٣٠٠٠٠ \text{ لومن}$$

ويكون عدد الوحدات اللازمة $= \frac{٤٣٠٠٠٠}{١٨٠٠٠} = ٢٤$ وحدة

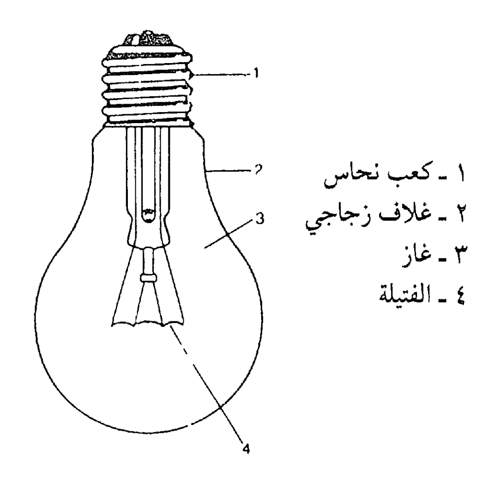
٥ : ٧ المصادر الضوئية :

تعتبر الشمس مصدر الضوء الطبيعي ويشتمل الضوء الصادر منها (ضوء النهار) على اشعاعات تغطي الطيف الضوئي ، وتقاس جودة أي ضوء آخر بمقارنته بضوء النهار . كما تختبر الألوان في ضوء النهار أو في ضوء مطابق لضوء النهار . وفيما يلي بيان بأهم مصادر الضوء الاصطناعي شائعة الاستعمال .

(أ) المصباح ذو الفتيلة : Incandescent Lamp :

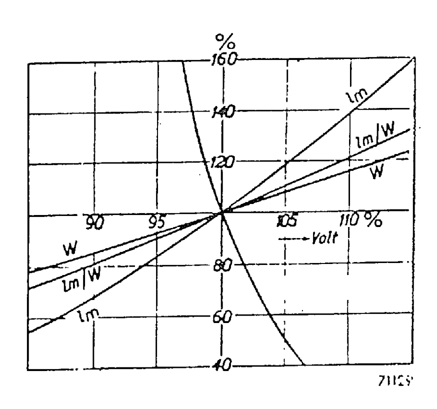
ويسمى المصباح أيضاً مصباح التنجستن نسبة إلى معدن التنجستن (Tungsten) المصنوعة منه فتيلة المصباح . ويتكون المصباح كما هو مبين بشكل رقم (٥ ـ ١٤) من غلاف زجاجي مفرغ أو يحوي غازاً خاملاً وبداخله حامل زجاجي يحمل فتيلة من معدن التنجستن ملفوفة في صورة ملف بسيط أو مضاعف توصل أطرافه بأسلاك تنتهي إلى طرف نحاس بقلاوظ ملتصق بالغلاف الزجاجي يستخدم لتثبيت المصباح في الدويل وكذلك توصيل التيار من خلاله إلى الفتيلة . وعند توصيل التيار للمصباح تسخن الفتيلة وتتوهج فتتحول الطاقة الكهربية الداخلة إليها إلى طاقة ضوئية وحرارة . ويعمل الغاز الخامل هنا على عدم اكسدة الفتيلة عند ارتفاع درجة حرارتها بالاضافة إلى منع تبخر المعدن وتوجد أشكال مختلفة لهذه المصابيح من

المصباح الصغير المستخدم في الكاشف اليدوي إلى المصابيح الشديدة التوهج المستخدمة في الفانوس السحري .



شكل رقم (٥ ـ ١٤) تكوين المصباح ذو الفتيلة

كما يبين الشكل رقم (٥ ـ ١٥) خواص المصباح والتي تمثل التغير في قيم المتغيرات المختلفة للمصباح بتغير الجهد المسلط على المصباح .



شكل رقم (٥ ـ ١٥) خواص المصباح ذو الفتيلة

ويمثل الشكل تغير الجهد من ٩٠٪ حتى ١١٠٪ من الجهد المقنن للمصباح والذي يرمز له بالقيمة ١٠٠٪ . والمتغيرات الممثلة في الشكل هي : القدرة (W) ، الفيض الضوئي Ø ، الكفاية الضوئية (η) ، عمر المصباح (Life) . وتعتبر الكفاية الضوئية لهذا النوع من المصابيح منخفضة ، وهذه هي النسبة بين الفيض الضوئي الخارج من المصباح والقدرة الكهربية الداخلة إليه ووحدتها (lumen / watt) ، وذلك لأن جزءاً كبيراً من هذه القدرة (حوالي ٧٠٪) يخرج في صورة حرارة مشعة منه بالإضافة إلى ١٨٪ حرارة منقولة منه بالتوصيل ويعني ذلك أن ١٠٪ فقط من القدرة الكهربية يخرج في صورة ضوء . ويقدر العمر الافتراضي لهذا النوع بحوالي ١٠٠٠ ساعة عمل ، ويمكن أن يزيد أو يقل عن هذه القيمة حسب جودة ونقاء المواد المصنوع منها المصباح .

(ب) مصابيح التفريغ الكهربائي : Gas Discharge Lamps :

ويكون هنا التفريغ الكهربائي في ضغط منخفض أو ضغط مرتفع وبهذا تسمى المصابيح من هذا النوع :

مصابيح التفريغ الكهربائي ذو الضغط المنخفض .

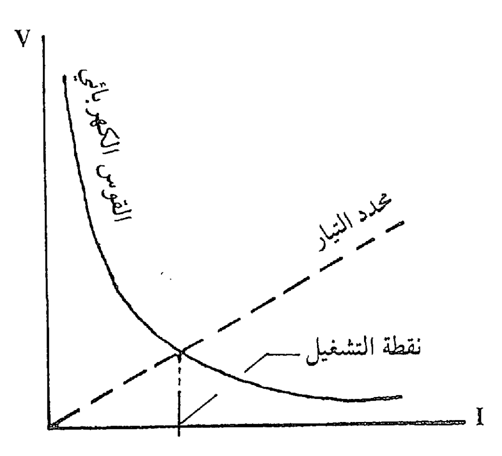
أو :

مصابيح التفريغ الكهربائي ذو الضغط المرتفع .

وهذا النوع من المصابيح لا يحوي فتيلة وإنما يسري التيار في صورة قوس كهربائي يسري في الغاز بين قطبي المصباح . والغازات المستعملة هي بخار الزئبق أو بخار الصوديوم أو غاز الزينون أو اليود .. وغيرها ، ولكل منها خواص تميز المصباح المستخدم به الغاز .

وتوجد ظاهرة عامة بين جميع هذه المصابيح وهي خاصية من خواص التفريغ الكهربائي ، وهذه الخاصية هي المقاومة السالبة للقوس الكهربائي

أي أن مقامة القوس الكهربائي تقل مع زيادة التيار وينتج عن ذلك زيادة مضطردة في التيار ونقص في المقاومة وهكذا . ويتطلب ذلك استخدام محدد للتيار في صورة ملف حثي خانق (Inductance) في حالات التيار المتردد ، ومقاومة (Resistance) في حالات التيار المستمر كما في شكل رقم (٥ - ١٦) ، وللمحدد في الحالتين خاصية خطية موجبة .



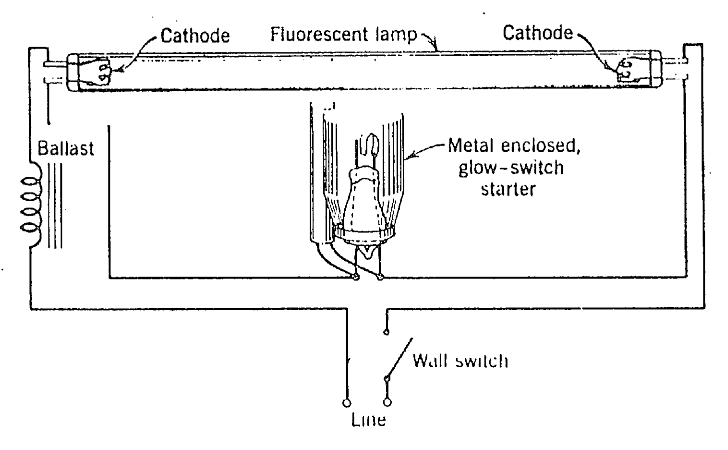
شكل رقم (٥ - ١٦) عمل محدد التيار مع مصابيح التفريغ الكهربائي .

وحيث أن الملف في حالة التيار المتردد يعتبر حملاً حثياً فإنه يسبب انخفاض عامل القدرة مما يستدعي استعمال مكثف إضافي لتحسين عامل القدرة للدائرة . ويتميز الملف عن المقاومة بأنه لا يستنفذ طاقة اضافية بالإضافة إلى طاقة المصباح بعكس المقاومة التي تستنفذ طاقة ناتجة عن القدرة بها التي تساوي I^2R .

وفيما يلي شرح للمصابيح الأكثر استخداماً من هذا النوع :

١ - مصباح بخار الزئبق ذو الضغط المنخفض :

ويسمى أيضاً بالمصباح الفلوري (Fluorescent Lamp) نسبة إلى المادة الفلورية التي تغطي الأنبوبة من الداخل .



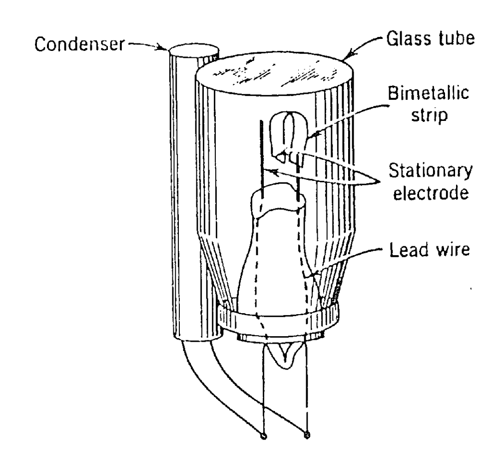
شكل رقم (٥ ـ ١٧) دائرة وتكوين المصباح الفلوري

يتكون المصباح كما هو مبين بالشكل رقم (٥ ـ ١٧) من أنبوبة زجاجية تحوي قطبين كل منهما به فتيلة من سلك معدني ، وبها بعض من غاز الأرجون يساعد على بدء اشتعال القوس ، ونقطة من الزئبق الذي يتبخر بمجرد الاشتعال فيصير المصباح مملوءاً ببخار الزئبق الذي يستمر فيه القوس الكهربائي .

وتحوي الدائرة علاوة على المصباح ملف حثي خانق يسمى (Ballast) لتحديد التيار الذي يعمل عليه المصباح ، وكذلك بادىء اشعال وهو عبارة عن مفتاح يغلق الدائرة فيمر التيار في الفتيلتين . فترتفع درجة حرارتهما ثم يفتح فجأة تلقائياً . وتسبب الحرارة بالأقطاب والجهد المرتفع الناتج عن القطع المفاجىء للدائرة الحثية سرعة اشتعال القوس الكهربائي بين القطبين في غاز الأرجون ثم في غاز بخار الزئبق .

ويبين الشكل (٥ ـ ١٨) تكوين بادىء الاشعال . وهو عبارة عن فقاعة زجاجية مملوءة بغاز الأرجون وبها قطبين أحدهما عبارة عن شريحة ثنائية المعدن (Bimetal) . وكذلك مكثف صغير لإمتصاص الشرارات الناتجة عن الفتح والقفل والتي تؤثر بالضوضاء في الأجهزة اللاسلكية . وعند مرور التيار يحدث توهج حول القطبين في غاز الأرجون يؤدي إلى تسخين القطب

المصنوع من شريحة ثنائية المعدن فينحني للخارج ليمس القطب الآخر مما يؤدي إلى تلاشي القوس الكهربائي وهنا تسخن فتائل الأقطاب بالمصباح بينما تبرد الشريحة ثنائِه المعدن في بادىء الاشعال وهنا يشتعل القوس في المصباح . وبذا فإنه يعمل دائرة قصر على بادىء الاشعال ويمر التيار بالمصباح عبر القوس الكهربائي ولا يمر في بادىء الاشعال . وتبدأ العملية من جديد إذا لم يشتعل المصباح حيث يكون البادىء قد برد وعادت الأقطاب لوضعها الأول .



شكل رقم (٥ ـ ١٨) تكوين بادىء الاشعال للمصباح الفلوري

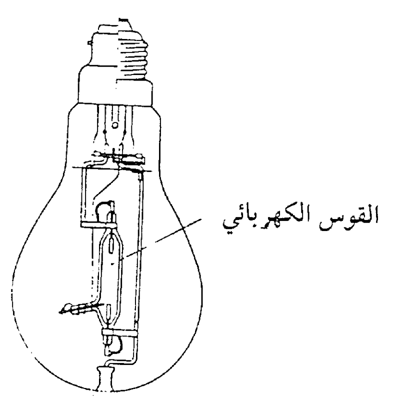
ويعطي القوس الكهربائي في بخار الزئبق أشعة بنفسجية غير مرئية أي لا تعطي ضوءاً ولكن يمكن تحويلها إلى أشعة مرئية (تعطي ضوءاً) باستخدام مادة فلورية توضع في صورة مسحوق أبيض يغطي السطح الداخلي للأنبوبة الزجاجية للمصباح . ويتوقف لون الضوء الناتج على نوع المادة الفلورية المستخدمة .

والطاقة الكهربية الداخلة إلى المصباح الفلوري يتحول منها ٢٢٪ إلى ضوء و ٢٦٪ إلى حرارة مشعة و ٧٢٪ إلى أشعة فوق بنفسجية غير مرئية وهذه يتحول منها جزء عن طريق الطلاء الفلوري إلى ضوء مرئي ، بحيث يصير الناتج ٢٢,٥٪ ضوء ، ٢٦,٥٪ حرارة مشعة ، ٥٣,٥٪ حرارة منقولة

بالتوصيل . وبالمقارنة نجد أن هذا المصباح يعطي أكثر من ضعف الضوء الناتج عن المصباح ذي الفتيلة الذي يساويه في القدرة .

٢ ـ مصباح بخار الزئبق ذو الضغط المرتفع :

High Pressure Mercury Vapour Lamp.



شكل رقم (٥ ـ ١٩)

مكونات مصباح بخار الزئبق ذو الضغط المرتفع

يتكون المصباح شكل (٥ ـ ١٩) من أنبوبة صغيرة من زجاج الكوارتز شديد الصلابة والذي يتحمل الحرارة الشديدة . وتحوي الأنبوبة قطبين أساسيين وقطب اضافي لبدىء اشعال القوس الكهربائي . وعند توصيل التيار يحدث قوس كهربائي صغير بين القطب الاضافي والقطب الأساسي الذي يجاوره لوجود مجال كهربائي بينهما وذلك في غاز الأرجون الذي تحويه الأنبوبة ويتسبب ذلك في تـأين الغاز الموجود بالأنبوبة لدرجة تسمح بمرور القوس بين القطبين الرئيسيين وينتج عن ذلك وهج بنفسجي اللون مسبباً تبخر نقطة من بخار الزئبق موجودة بالأنبوبة ويتحول قوس غاز الأرجون إلى قوس كهربائي في بخار الزئبق مصحوباً بزيادة في التيار . وتسمى الفترة بين حدوث قوس الأرجون وقوس بخار الزئبق بفترة التسخين . وتتكرر هذه العملية عند انقطاع التيار عن المصباح أو إذا انخفض الجهد أكثر من ١٥٪ من قيمته

المقننة إذ يتوقف القوس ويستمر فترة يبرد فيها المصباح وينخفض الضغط داخل الأنبوبة ثم يبدأ القوس مرة أخرى مما يتطلب وقتاً أكبر في هذه الحالة وقد يصل إلى ٣ دقائق .

ويحيط بالأنبوبة الصغيرة وتوصيلاتها أنبوبة كبيرة من زجاج صلب للوقاية .

ويعطي قوس بخار الزئبق أشعة فوق بنفسجية يمكن تحويلها إلى ضوء مرئي بطلاء الغلاف الزجاجي الخارجي من الداخل بمادة فلورية بيضاء مثل الحال في المصابيح الفلورية .

ويتميز المصباح من هذا النوع بشدة سطوعه وإعطائه فيضاً ضوئياً مرتفعاً بالنسبة للقدرة المغذية للمصباح .

ويحتاج هذا المصباح أيضاً إلى ملف حثي خانق في دائرة التغذية لتحديد تيار التشغيل .

وتستخدم هذه المصابيح لإضاءة الطرق أو عنابر المصانع حيث تكون وحدة الانارة مرتفعة جداً بحيث لا تقع في مستوى البصر .

٣ - مصباح بخار الصوديوم ذو الضغط المرتفع :

High Pressure Sodium Vapour Lamp.

يماثل هذا المصباح في التكوين مصباح بخار الزئبق ذا الضغط العالي ولكن توضع به قطعة من الصوديوم بدلاً من قطرة الزئبق . ويعمل المصباح على نفس المنهج الذي يعمل عليه مصباح بخار الزئبق ويحتاج أيضاً إلى فترة تسخين للحصول على اشعاعه الضوئي المستقر .

ويشع مصباح بخار الصوديوم ضوءاً مرئياً أحادي اللون يقع في مدى

الاشعاع (الأصفر - البرتقالي) من الطيف وهو بذلك يعطي ضوءاً ذا لون واحد هو الأصفر . والمصباح لا يحتاج هنا إلى مادة فلورية .

ويستخدم مع المصباح هنا أيضاً ملف حثي خانق لتحديد التيار في القوس الكهربائي مثل جميع مصابيح الأقواس الكهربية .

ويتميز هذا المصباح بأن الضوء الصادر منه (الأصفر) يقع في مدى أعلى حساسية للعين مما يجعله أصلح في الحالات التي تتطلب تمييزاً أعلى مثل مصابيح الضباب في السيارات ، كما يستعمل أيضاً في إنارة الشوارع ذات المرور السريع وكذلك في عنابر المصانع حيث لا يهم لون الضوء بقدر أهمية المقدرة على التمييز .

مصابيح حديثة من النوع ذات القوس الكهربائي :

هناك مصابيح استحدثت في الفترة الأخيرة ودخلت مجالات الاستخدام في الانارة التي تتطلب لون الضوء علاوة على اعطائها مستوى عال جداً من الضوء . وأهم هذه المصابيح :

١ - مصباح الزينون : **Xenon Lamp** :

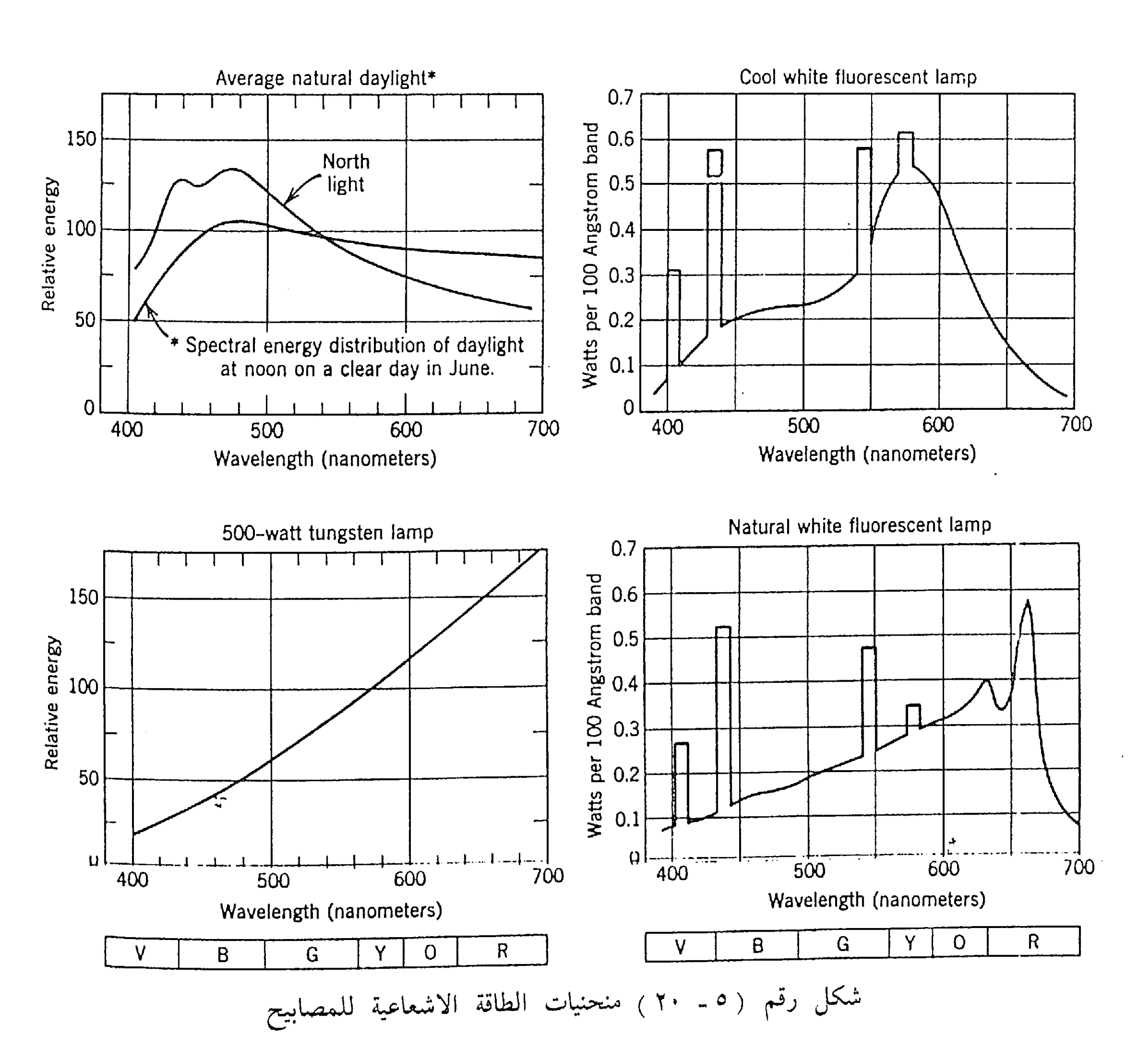
ويستخدم فيه غاز الزينون وهو يعطي ضوءاً مقارباً جداً لضوء النهار ، مما يجعله مناسباً جداً للاستعمال في استوديوهات التصوير في السينما والتليفزيون وفي مصانع الصباغة حيث يتطلب الأمر تمييزاً دقيقاً للألوان .

٢ - مصباح معدن الهالايد : **Metal Halide Lamp** :

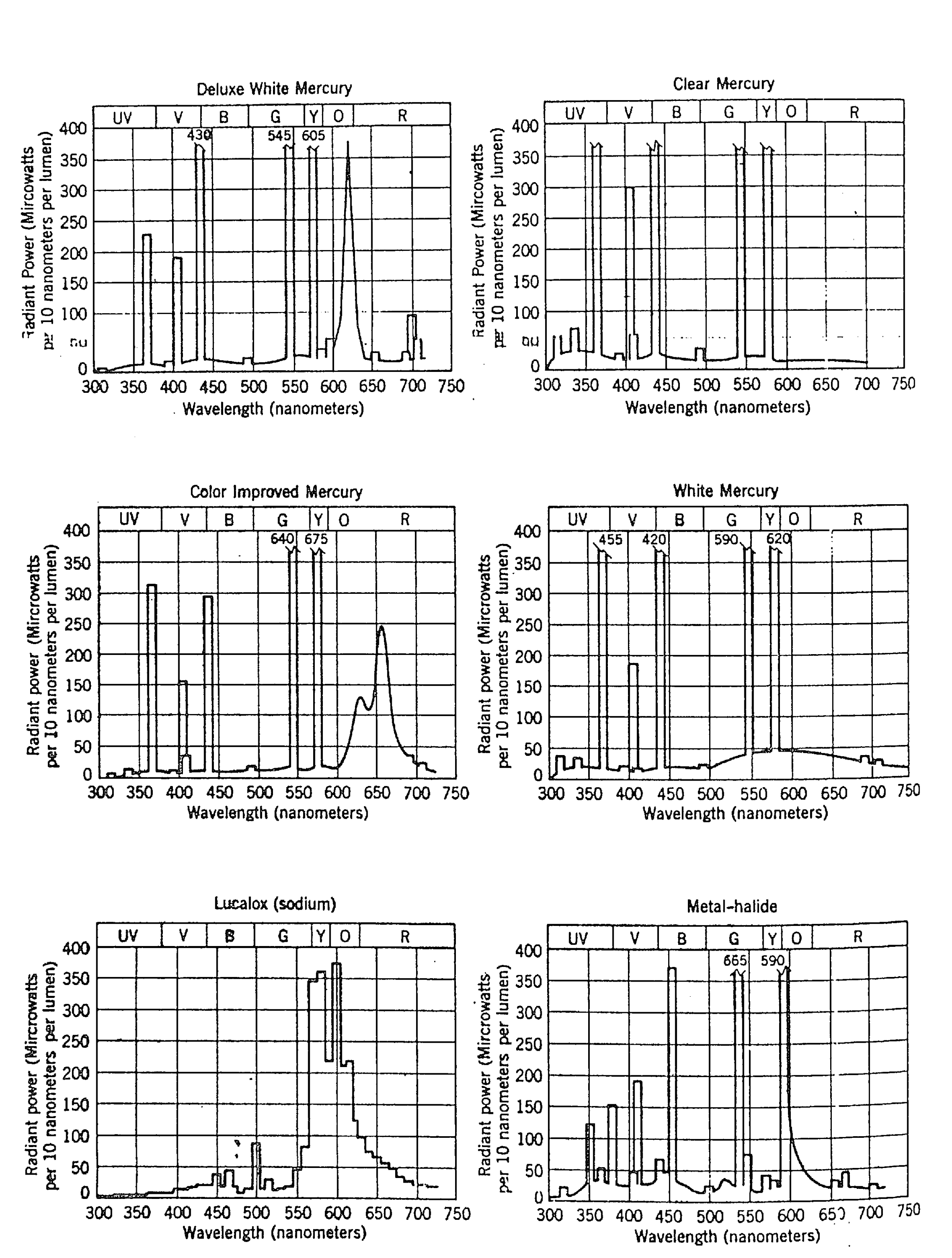
ويستخدم فيه اضافات يودية مثل الأنديوم والتاليوم والصوديوم لكي يعطي جودة ضوئية أعلى وكذلك ضوءاً ذا لون أفضل . ويستخدم المصباح في

كشافات عاكسة صغيرة تستعمل لإضاءة الملاعب والساحات المتسعة وواجهات المباني في الاحتفالات .

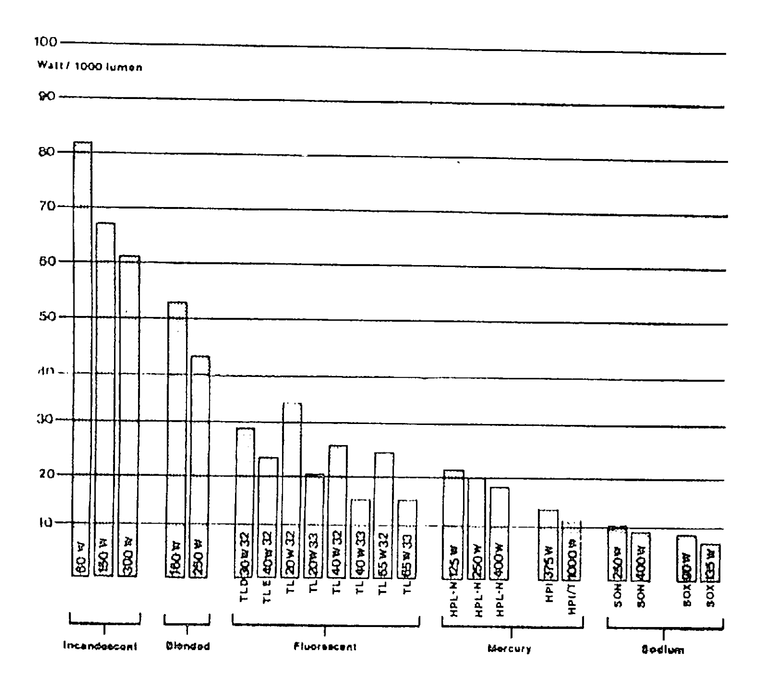
ويبين شكل رقم (٥ ـ ٢٠) منحنيات الطاقة الإشعاعية الطيفية للمصابيح بأنواعها المختلفة كما يبين كذلك مقارنات لبعضها مع المنحنى القياسي لحساسية عين الانسان للطاقة الاشعاعية الطيفية . كما يبين الشكل رقم (٥ ـ ٢١) الكفاية الضوئية للأنواع المختلفة من المصابيح بوحدات اللومن لكل وات (lm / watt) .



شكل رقم (٥ ـ ٢٠) منحنيات الطاقة الاشعاعية للمصابيح



(تابع) شكل رقم (٥ ـ ٢٠) منحنيات الطاقة الاشعاعية للمصابيح



شكل رقم (٥ ـ ٢١) الكفاءة الضوئية للأنواع المختلفة من المصابيح .

الباب السادس

البطاريات BATTERIES

٦ ـ ١ مقدمة :

البطارية عبارة عن مجموعة من الخلايا الكهربية موصلة على التوالي أو على التوازي أو على التوالي والتوازي لتعطي جهداً معيناً وتياراً معيناً . وتنقسم الخلايا الكهربية إلى نوعين :

١ ـ الخلايا الابتدائية (الأعمدة الابتدائية) Primary Cells :

وتنتج الطاقة الكهربية هنا نتيجة لتفاعلات كيميائية تتغير معها المواد المستعملة مما يستدعي تغييرها لإعادة استخدام الخلية .

٢ ـ الخلايا الثانوية (الأعمدة الثانوية) Secondary Cells :

وتحدث في هذه الخلايا تفاعلات كهروكيميائية تبادلية متعاكسة الاتجاه بحيث تخزن الطاقة الكهربية في اتجاه ثم تعطيها لدائرة الحمل في الاتجاه الآخر . والخلايا من هذا النوع تكون إما حامضية أو قلوية .

٦ ـ ٢ الخلايا الابتدائية Primary Cells :

تتكون الخلية هنا من قطبين مغمورين في محلول الكتروليتي ومثال ذلك خلية لاكلانشيه (Laclanche Cell) والتي تسمى أيضاً الخلية المنجنية

(Manganic Cell) حيث تستخدم ثاني اكسيد المنجنيز شكل (٦ - ١) .

فالقطب الموجب مصنوع من ثاني اكسيد المنجنيز ($Mn\ O_2$) .

والقطب السالب مصنوع من الزنك (Zn) .

والمحلول الالكتروليتي عبارة عن محلول ملح من أملاح النوشادر مثل محلول كلوريد النوشادر بنسبة ٢٠٪ ($NH_4\ Cl$) .

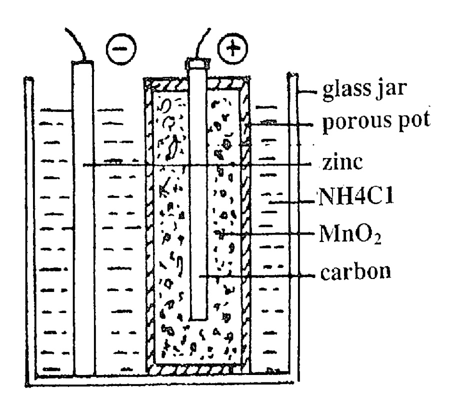
ويتم التفاعل الكيميائي على النحو التالي :

$$Zn + 2NH_4\ Cl + 2\ Mn\ O_2 = Zn\ (NH_3)_2\ Cl_2 + H_2O + Mn_2\ O_3$$

وتعطي الخلية جهداً قدره ١,٥ فولت ومقاومتها الداخلية بين ٠,٢ ، ٠,٥ أوم .

ومصدر الطاقة هنا هو في تحويل الزنك إلى أكسيد الزنك ، وتتوقف قيمة الطاقة التي تعطيها الخلية بالأمبير ساعة على وزن المواد المستخدمة (الأقطاب) .

والبطارية الجافة عبارة عن حالة من هذا النوع من الخلايا حيث يستبدل السائل الالكتروليتي بعجينة من محلول كلوريد النوشادر المخلوط بنشارة الخشب والدقيق والخميرة .. الخ .



شكل رقم (٦ - ١) تكوين الخلية الابتدائية

٦ - ٣ الخلايا الثانوية (Secondary Cells) :

تقوم هذه الخلايا بعمليات كهروكيميائية تبادلية ينتج عنها شحن الخلية في اتجاه ثم أخذ الطاقة الموجودة بها في الاتجاه المعاكس للتفاعل . وتتكون الخلايا من هذا النوع من مجموعات لتكون مراكمات (Accumulators) وهناك نوعان من هذه الخلايا وهما الحامضي والقلوي .

٦ - ٤ الخلايا الحامضية :

وتصنع هنا قطبي البطارية من الرصاص (Pb) للقطب السالب وأكسيد الرصاص ($Pb\ O_2$) للقطب الموجب .

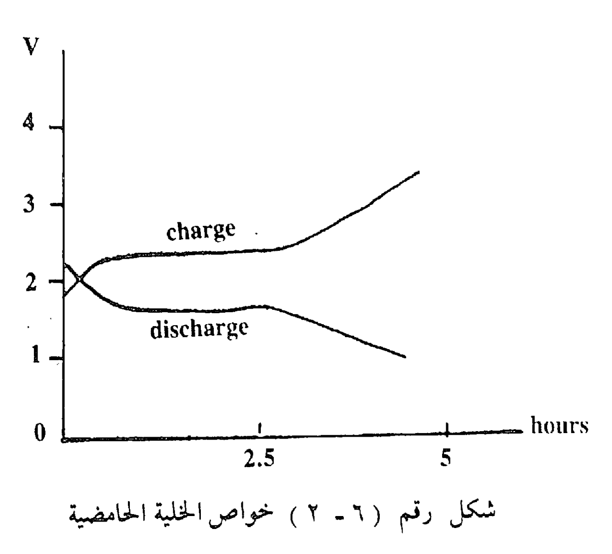
والسائل الالكتروليتي هنا هو حامض الكبريتيك ($H_2\ SO_4$) ويتم التفاعل الكيميائي على النحو التالي :

$$Pb\ O_2 + 2H_2\ SO_4 + Pb \underset{\text{التفريغ}}{\overset{\text{الشحن}}{=}} 2\ Pb\ SO_4 + 2H_2O$$

ويلاحظ أنه عند التفريغ يتحول الرصاص إلى كبريتات الرصاص ويقل تركيز حامض الكبريتيك ، بينما أثناء الشحن تتحول كبريتات الرصاص إلى اكسيد الرصاص والرصاص نفسه مع ارتفاع في تركيز حامض الكبريتيك ، وبذا تعود الخلية إلى حالتها الأولى .

ويتأثر عمر الخلية بكمية كبريتات الرصاص المتراكمة على ألواح الرصاص والارتفاع الزائد لتركيز الحامض مما يدعو إلى الاهتمام بقياس درجة تركيز الحامض باستمرار بواسطة هيدرومتر (جهاز قياس الكثافة) وتكون الكثافة في حالة الشحن ١,٢١ ويجب ألا تقل عن ١,١٨ عند التفريغ ويبلغ جهد الخلية المشحونة ٢,٢ فولت ويصل مع التفريغ إلى ١,٨ فولت حيث يجب أن تشحن الخلية عندئذ ، وإلا فإن التفاعل يصير غير تبادلي ، هذا ويرتفع الجهد عند الشحن حتى ٢,٦ فولت شكل (٦ - ٢) .

ويلاحظ أنه عند تمام شحن الخلية تخرج غازات الهيدروجين من ناحية القطب السالب والأكسجين من ناحية القطب الموجب . ويجب وقف الشحن عندئذ .



شكل رقم (٦ - ٢) خواص الخلية الحامضية

جودة البطارية الحامضية :

تقدر جودة البطارية بطريقتين :

(أ) جودة الأمبير ساعة Ah = $\frac{\text{الأمبير ساعة بالتفريغ}}{\text{الأمبير ساعة للشحن}}$

(ب) جودة الوات ساعة Wh

= جودة الأمبير ساعة × $\frac{\text{متوسط الجهد أثناء التفريغ}}{\text{متوسط الجهد أثناء الشحن}}$

وتكون جودة الأمبير ساعة عادة بين ٩٠ - ٩٥٪ .

بينما جودة الوات ساعة بين ٧٢ - ٨٠٪ .

كبرتة الأقطاب بالبطاريات الحامضية (Sulfation) :

إذا لم تشحن البطارية بانتظام ، أو عند ترك البطارية مفرغة لمدة طويلة فإن كبريتات الرصاص ($Pb\ SO_4$) المكونة على الألواح أثناء التفريغ لا تختزل بالكامل إلى أكسيد الرصاص أو الرصاص وينتج عن ذلك ارتفاع في المقاومة الداخلية للخلية ونقص في جودتها . وتنتج نفس الظاهرة أحياناً من الشحن الزائد أيضاً . ويمكن إزالة هذه الكبرتة بالشحن المتوالي للبطارية عدة مرات بدون تفريغ حتى تزول الكبرتة .

وللمحافظة على البطارية في حالة جيدة يجب مراعاة الآتي :

(أ) عدم ترك البطارية بدون شحن خاصة عندما يبلغ جهدها أقل قيمة للجهد .

(ب) عدم ترك البطارية فارغة لمدة طويلة .

(جـ) يجب بقاء مستوى السائل الالكتروليتي مغطياً الألواح تماماً وعدم تعريض الألواح للهواء مع اضافة الماء المقطر (فقط) عند اللزوم عند نقص السائل .

٦ ـ ٥ الخلايا القلوية Alcaline Cells :

يوجد نوعان شائعا الإستعمال من هذه الخلايا وهي : خلية النيكل ـ كادميوم (Nickel — Cadmium) وخلايا النيكل ـ حديد (Nickel - Iron) .

خلايا النيكل ـ كادميوم :

والقطب الموجب هنا مصنوع من ايدروكسيد النيكل $Ni\ (OH)_3$.

بينما القطب السالب من الكادميوم الاسفنجي (Cd) .

والسائل الالكتروليتي عبارة عن محلول البوتاس بنسبة ٢٠٪ (Potassium Hydroxide) .

وتصنع الأقطاب من ألواح الحديد المطلية بالنيكل وبها ثقوب تحمل المادة الفعالة والاناء الحاوي يصنع أيضاً من الحديد المطلي بالنيكل .

ويتم التفاعل الكهروكيميائي على النحو التالي :

$$2Ni\ (OH)_3 + 2KOH + CD = 2Ni(OH)_2 + 2KOH + CD(OH)_2$$

ويلاحظ أن تركيز ايدروكسيد البوتاسيوم لا يتغير أثناء التفاعل ولذا فإنه يمكن استعمال كمية قليلة من السائل الالكتروليتي مما يجعل البطارية أقل حجماً .

فمثلاً البطارية الحامضية ١٠٠ أمبير ساعة تحوي ٦,٨ لتر من السائل بينما البطارية القلوية ١٠٠ أمبير ساعة تحوي ١,٢ لتر من السائل

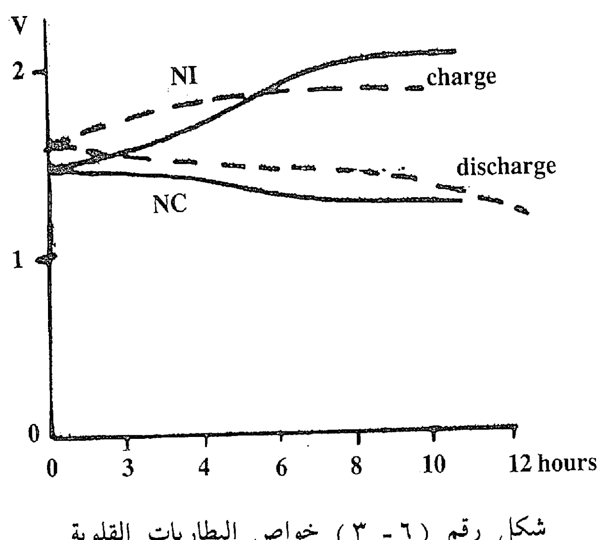
خلايا النيكل ـ الحديد :

ويكون القطب الموجب هنا أيضاً من ايدروكسيد النيكل $Ni(OH)_3$ بينما القطب السالب من الحديد الاسفنجي (Sponge Iron) والسائل الالكتروليتي هو محلول البوتاس (Potassium Hydroxide) .

ويتم التفاعل الكهروكيميائي في الشحن والتفريغ حسب المعادلة الآتية :

$$2Ni(OH)_3 + 2KOH + Fe = 2Ni(OH)_2 + 2KOH + Fe(OH)_2$$

ويلاحظ هنا أيضاً عدم تغير تركيز السائل الالكتروليتي مما يجعل وزن وحجم البطارية صغيراً .



شكل رقم (٦ - ٣) خواص البطاريات القلوية

ومن مزايا البطاريات القلوية ثبات المواد الفعالة على الألواح مما يجعلها أكثر تحملاً للصدمات وحالات القصر عن البطاريات الحامضية وهي كذلك أخف وزناً وأقل حجماً لنفس السعة .

وتقدر جودة البطاريات القلوية بالآتي :

جودة الأمبير ساعة ٦٦,٦٪

جودة الوات ساعة ٥٠٪ للكادميوم ، ٤٧٪ للحديد .

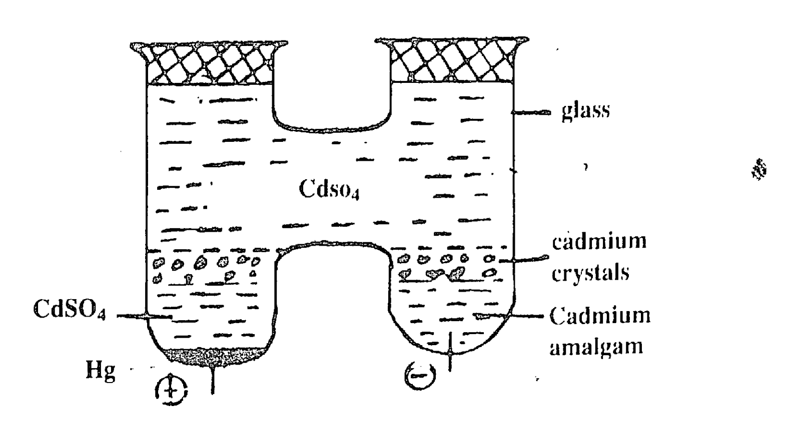
٦ - ٦ الخلية العيارية (Standard Cell) :

الخلية العيارية هي تلك التي لا يكاد جهدها يتأثر مع الوقت أو الحرارة وهي ليست مصدراً للطاقة ولكنها مصدر لجهد ثابت يستخدم في دوائر وأجهزة القياس في المعامل لمعايرة أجهزة القياس . وجهد هذه البطارية ثابت لمدة طويلة إذا لم يسحب منها تيار محسوس .

بطارية الكادميوم (Weston Cadmium Cell) :

وجهدها قدره ١,٠١٨٣ فولت وهو ثابت دائماً حتى ١ / ١٠٠٠٠٠ طالما التيار المأخوذ منها لا يتجاوز ١و٠ مللي أمبير والحرارة ثابتة .

وتتكون الخلية من وعاء زجاجي كالمبين بالشكل رقم (٦ - ٤) ، والذي يحوي أقطاباً سائلة أو نصف سائلة فالقطب الموجب زئبق بينما القطب السالب (الكاثود) عبارة عن املجمات الكادميوم الزئبقي (١٠ - ١٥ ٪ كادميوم مذاباً في الزئبق) . والسائل الالكتروليتي هو كبريتات الكادميوم ($Cd\,SO_4$) وتستخدم مادة مانعة للاستقطاب من كبريتات الزئبق ($Hg\,SO_4$) في صورة غير قابلة للذوبان وهذه المادة تكون فعالة فقط عندما يكون التيار صغيراً جداً . فإذا زاد التيار فيحدث استقطاب للخلية ، ويتطلب الأمر حينئذ ترك الخلية بدون حمل حوالي ٦ ساعات حتى تعود لحالتها الأولى حيث يمكن استخدامها ثانية .

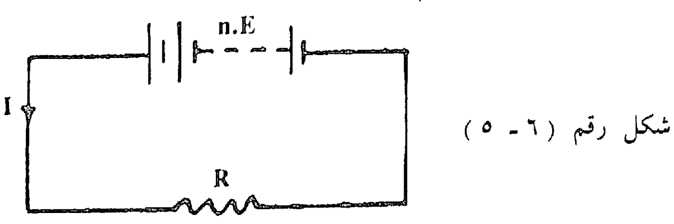


شكل رقم (٦ - ٤) تكوين الخلية العيارية

٦ - ٧ تجميع الخلايا في بطاريات :

تجمع الخلايا في مجموعات موصلة على التوالي والتوازي لتكوين بطارية أو مراكم ويلاحظ في هذه الحالة ما يأتي :

(أ) تجميع التوالي شكل رقم (٦ - ٥) :



شكل رقم (٦ - ٥)

إذا فرضنا أن عدد الخلايا الموصلة مع بعضها على التوالي = n

وجهد كل خلية = E . ومقاومتها الداخلية = r .

فيكون الجهد الكلي للبطارية = nE فولت .

والمقاومة الداخلية الكلية = $n.r$ أوم .

والمقاومة الكلية بالدائرة = $R + nr$ أوم .

ويكون التيار المار بالدائرة $I = \frac{n E}{R + nr}$

فإذا كانت $R << nr$:

فيكون : $I = \frac{nE}{nr} = \frac{E}{r}$

أي = تيار الخلية الواحدة .

أي أن تيار الدائرة في هذه الحالة لا يزيد بتوصيل الخلايا على التوالي :

أما إذ كانت $n r << R$.

فإن التيار : $I = \frac{n E}{R} = n \frac{E}{R}$

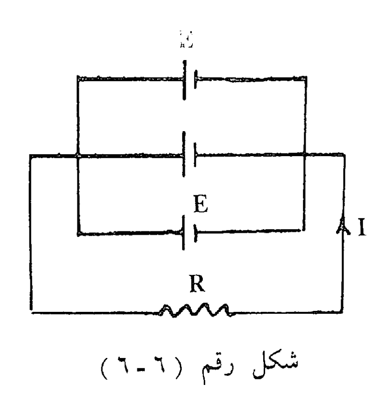
أي n مرات التيار الناتج عن خلية واحدة .

وبذا فإن البطارية تعطي أقصى تيار للحمل إذا كانت مقاومة الخلايا صغيرة جداً بالنسبة لمقاومة الحمل R . ولذا فإن تجميع التوالي يستعمل في حالة كون مقاومة الحمل كبيرة بالنسبة للمقاومة الداخلية للبطارية .

(ب) تجميع التوازي شكل رقم (٦ ـ ٦) :

وتوصل هنا جميع الأقطاب الموجبة مع بعضها والأقطاب السالبة مع بعضها وبذا يكون جهد البطارية مساوياً لجهد الخلية الواحدة = E فولت .

والمقاومة الداخلية لمجموعة خلايا قدرها (n) خلية ومقاومة كل منها (r) تساوي $r \cdot \frac{1}{n}$ أوم .



شكل رقم (٦-٦)

وتكون المقاومة الكلية بالدائرة

$$= R + \frac{r}{n}$$

وتيار الحمل :

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}}$$

فإذا كانت : $\frac{r}{n} << R$ فإن : $I = \frac{E}{R}$

أي يساوي التيار الناتج عن خلية واحدة . أي لا فائدة تعود من هذه التوصيلة بهذا الوضع :

أما إذا كانت : $R << \frac{r}{n}$ فإن : $I = n\frac{E}{r}$

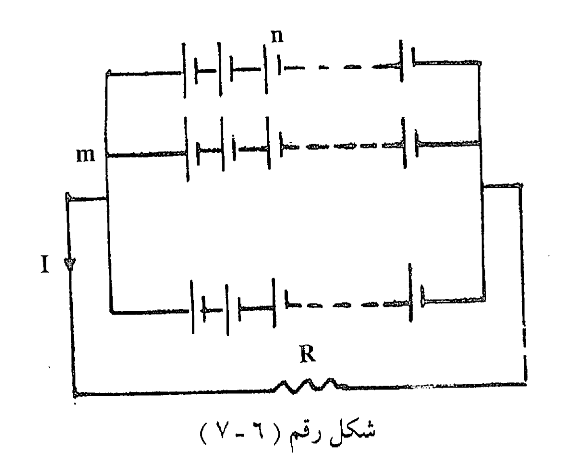
وهو يساوي (n) مرة التيار الذي يمكن أن نحصل عليه من خلية واحدة .

ولذا تستعمل مجموعات التوازي إذا كانت مقاومة الحمل صغيرة جداً بالنسبة لمقاومة البطارية .

(جـ) التجميع المركب شكل رقم (٦-٧) :

إذا كان عدد الخلايا الموصلة على التوالي في كل خط n خلية ، وكان عدد الخطوط الموصلة على التوازي m خط ،

فتكون المقاومة الداخلية لخلايا الخط الواحد = n.r أوم .



شكل رقم (٦ - ٧)

والمقاومة الكلية لعدد m خط = $\frac{n.r}{m}$ أوم .

وتكون المقاومة الكلية بالدائرة = $R + \frac{n.r}{m}$.

وجهد البطارية = جهد الخط الواحد = m.E فولت .

وتيار البطارية :

$$I = \frac{n\,E}{R + \frac{n.r}{m}}$$

$$= \frac{m.n.E}{mR + nr} = \frac{NE}{mR + nr}$$

حيث العدد الكلي للخلايا :

$$N = m.n$$

والقيمة القصوى للتيار تكون عندما يصير المقام أقل ما يمكن :

أي :

$$(mr + nr)\ \text{minimum}$$

وبفرض أن :

$$y = mR + nr$$

$$= (\sqrt{mR})^2 + (\sqrt{nr})^2$$
$$= (\sqrt{mR} - \sqrt{nr})^2 + 2\sqrt{mR}\sqrt{nr}$$

ويكون هذا المقدار أقل ما يمكن عندما يكون المقدار بين القوسين أقل ما يمكن أي :

$$mR = nr$$

أي أن المقاومة الخارجية = المقاومة الداخلية للبطارية .

وتكون الجودة في هذه الحالة ٥٠٪ .

حيث أن نصف القدرة المعطاة من البطارية يستنفذ في الحمل الخارجي والنصف الآخر يستنفذ في المقاومة الداخلية للبطارية .

ويلاحظ أنه يمكن حساب التكوين الذي يعطي أعلى تيار من المعادلتين :

$$m\,n = N \quad ، \quad mR = nr$$

جودة المجموعة المركبة :

$$\eta = \frac{\text{out put}}{\text{input}}$$

$$\eta = \frac{\text{useful power}}{\text{total power produced}}$$

$$\eta = \frac{I^2R}{I^2R + I^2r} = \frac{R}{R + r}$$

حيث r هي المقاومة الداخلية الكلية للبطارية و R هي مقاومة الحمل .

شرط الحصول على أكبر قدرة من البطارية :

إذا فرضنا أن جهد الأطراف للبطارية = V فولت .

وأن تيار الحمل = I ومقاومة الحمل = R أوم .

فإن :

$$V = I.R$$

ولكن التيار :

$$I = \frac{E}{R + r}$$

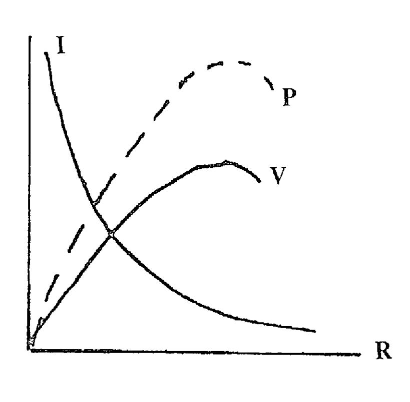
$$V = E \frac{R}{R + r} = E \frac{R + r - r}{R + r}$$

$$= E \left(1 - \frac{r}{R + r}\right)$$

والقدرة المفيدة وهي القدرة المسلطة على المقاومة الخارجية R هي :

$$P = VI \text{ watts}$$

وبرسم المنحنى $R \rightarrow P$ شكل رقم (٦ - ٨) نجد المقاومة التي تعطي البطارية عندها أقصى حمل .



شكل رقم (٦ - ٨)

٦ ـ ٨ أمثلة محلولة :

مثال : ١ :

وضعت بطارية فارغة للشحن على تيار ٥ أمبير ولمدة ٣,٥ ساعة وعلى جهد شحن متوسط ١٣,٥ فولت . ثم عمل تفريع للبطارية على مدى ٦ ساعات وعلى جهد ثابت ١٢ فولت ومن خلال مقاومة قدرها (R) أوم .
أوجد :

(أ) قيمة (R) للحصول على جودة أمبير ساعة قدرها ٨٥٪ .

(ب) قيمة جودة الوات ساعة للبطارية .

قيمة الأمبير ساعة عند الشحن = ٥ × ٣,٥ = ١٧,٥ أ س .

تيار التفريغ = $\frac{V}{R} = \frac{١٢}{R}$ أمبير

الأمبير ساعة عند التفريغ = ٦ × $\frac{١٢}{R} = \frac{٧٢}{R}$ أ س

(أ) جودة الأمبير ساعة = $\frac{٧٢}{R} \times \frac{١}{١٧,٥} = \frac{٧٢}{R١٧,٥}$

= ٠,٨٥

∴ R = ٤,٨٤ أوم

(ب) جودة الوات ساعة = ٠,٨٥ × $\frac{١٢}{١٣,٥}$ = ٠,٧٥٦

= ٧٥,٦ ٪

مثال : ٢ :

بطارية طوارىء تتكون من ١٧٥ وحدة قلوية موصلة على التوالي

وكانت طاقة كل بطارية ١٠٠٠ أمبير ساعة . فإذا كانت جودة الأمبير ساعة ٨٠٪ ، احسب القدرة المتوسطة التي تعطيها البطارية على مدى ٨ ساعات تفريغ إذا كان الجهد المتوسط لكل بطارية اثناء التفريغ ١,٢ فولت .

طاقة المجموعة = ١٧٥ × ١٠٠٠ . أ س

جودة الأمبير ساعة = ٠,٨

طاقة الخرج للمجموعة = ١٧٥ × ١٠٠٠ × ٠,٨ أ س

مدة التفريغ = ٨ ساعات

$$\text{تيار الخروج} = \frac{١٧٥ \times ١٠٠٠ \times ٠,٨}{٨} = ١٧٥٠٠ \text{ أمبير}$$

قدرة الخروج = ١٧٥٠٠ × ١,٢ = ٢١ كيلوات

مثال : ٣ :

بطارية تتكون من ٢٥ وحدة حامضية لكل منها طاقة تفريغ قدرها ٢٠٠ أمبير ساعة على مدى ١٠ ساعات . والمطلوب شحنها تماماً بتيار شحن ثابت وعلى مدى ١٢ ساعة . فإذا كانت جودة الأمبير ساعة للبطارية ٨٠٪ ، وكان جهد المنبع ١١٠ فولت تيار مستمر ، وكان جهد الوحدة عند بدىء الشحن ١,٨ فولت ، وفي نهايته ٢,٦ فولت . أوجد القيمة القصوى وأقل قيمة للمقاومة الخارجية المستعملة .

$$\text{الدخل لكل خلية عند الشحن} = \frac{٢٠٠}{٠,٨} = ٢٥٠ \text{ أ س}$$

$$\text{تيار الشحن الثابت} = \frac{٢٥٠}{١٢} = \frac{١٢٥}{٦} \text{ أمبير}$$

$$\text{تيار الشحن في كل لحظة} = I = \frac{V - E_b}{R}$$

∴ عند بداية الشحن E_b = ٢٥ × ١,٨ = ٤٥ فولت

∴ $\frac{١٢٥}{٦} = \frac{١١٠ - ٤٥}{R_1}$ وتكون R_1 = ٣,١٢ أوم

عند نهاية الشحن E_b = ٢٥ × ٢,٦ = ٦٥ فولت

∴ $\frac{١٢٥}{٦} = \frac{١١٠ - ٦٥}{R_2}$ وتكون R_2 = ٢,١٦ أوم

مثال : ٤ :

مجموعة بطاريات تتكون من ١٥ خلية كل منها ١,٤ فولت ولها مقاومة داخلية ٠,٨ أوم محملة بمقاومة قدرها ٣٠ أوم .

أوجد :

(أ) تيار التغذية .

(ب) الجهد على طرفي البطارية .

جهد البطارية = ١٥ × ١,٤ = ٢١ فولت .

المقاومة الداخلية الكلية للمجموعة = ١٥ × ٠,٨ = ١٢ أوم

المقاومة الكلية للدائرة = ١٢ + ٣٠ = ٤٢ أوم

(أ) تيار التغذية I = $\frac{٢١}{٤٢}$ = ٠,٥ أمبير

(ب) الجهد على طرفي البطارية = ٣٠ × ٠,٥ = ١٥ فولت

أو :

$$V = E - I.r = 21 - 0.5 \times 12 = 15\ V$$

مثال : ٥ :

بطارية تعطي تيار قدره ٠,٦ أمبير عندما تكون المقاومة الخارجية ٢ أوم .

وتعطي تيار قدره ٠,٢ أمبير عندما تكون المقاومة الخارجية ١٢ أوم .

أوجد :

(أ) المقاومة الداخلية ،

(ب) جهد البطارية في حالة اللاحمل .

$$\frac{E}{2 + r} = ٠,٦ \quad ، \quad \frac{E}{12 + r} = ٠,٢$$

$\therefore \quad E = 1.2 + 0.6\, r = 2.4 + 0.2\, r$

∴ (أ) r = ٣ أوم

(ب) E = ١,٢ + ١,٨ = ٣ فولت .

مثال : ٦ :

المطلوب تشكيل ٢٤ خلية في بطارية مجمعة لتعطي أكبر تيار في مقاومة حمل قدرها ٥ أوم . فإذا كان جهد اللاحمل لكل خلية ٢,١ فولت ومقاومتها الداخلية ٢ أوم . أوجد أحسن تشكيل وقيمة التيار في الحمل .

$$m R = n r \qquad 5 m = 2 n \qquad n = \frac{5}{2} m$$

$$m n = 24 = \frac{5}{2} m^2 \qquad \therefore \quad m^2 = \frac{48}{5} = 9.6$$

$\therefore m = 3$ rows, $n = 8$ cells in a row

$$I = \frac{2.1 \times 8}{5 + \frac{16}{3}} = 1.63 \text{ Amp.}$$



الباب السابع

الكهروستاتيكية ELECTROSTATICS

٧ ـ ١ الشحنة الكهربية :

إن الأجسام الطبيعية المحيطة بنا تكون عادة متعادلة رغم أنها تتكون من جسيمات تحتوي على شحنات كهربية (الكترونات وبروتونات) ، وهذا نتيجة لكون الشحنة الموجبة التي تحملها نواة الذرة تكون مساوية تماماً للشحنة السالبة التي يحملها الكترونات هذه الذرة . ويكتسب الجسم شحنة كهربية عندما تصبح الشحنتان الموجبة والسالبة في الجسم ـ أو في جزء منه ـ غير متساويتين . .

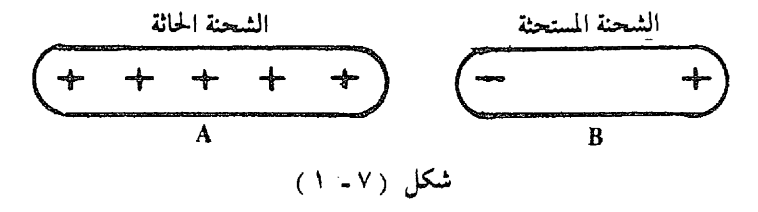
ويتم ذلك نتيجة لبعض العمليات نذكر منها :

١ ـ الإحتكاك .
٢ ـ الحث الكهربي .
٣ ـ الشحن الكهربي .
٤ ـ بعض العمليات الكيميائية .

وفي جميع هذه العمليات السابقة يكون الشحن عن طريق إنتقال الشحنات السالبة فقط (الالكترونات) . أي أن الجسم يكتسب شحنة سالبة

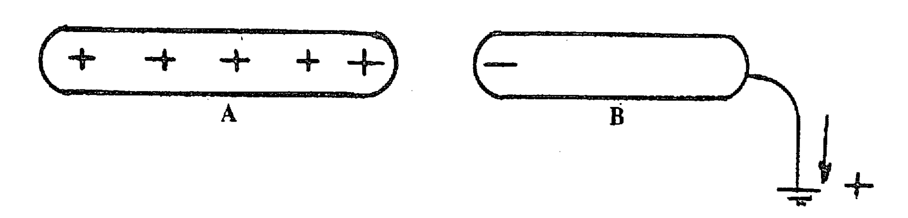
عند إضافة الكترونات إليه ويكتسب شحنة موجبة عند سحب الكترونات منه .

٧ ـ ٢ الحث الكهربي Electrostatic Induction :

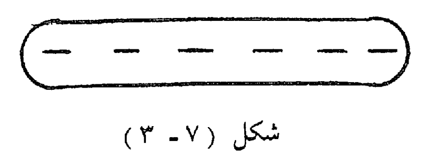


شكل (٧ ـ ١)

عند تقريب جسم A مشحون بشحنة موجبة من جسم آخر عازل (شكل ٧ ـ ١) فإننا نجد أن شحنة سالبة تتكون على طرف الجسم القريب من الجسم A، بينما تتكون شحنة موجبة مساوية لها على الطرف البعيد من الجسم B . تسمى هذه الظاهرة بظاهرة الحث الكهربي ، وتسمى الشحنة الموجودة على الجسم A بالشحنة الحاثة والشحنة التي نتجت على الجسم B بالشحنة المستحثة . ونلاحظ هنا أن الشحنة المستحثة السالبة الموجودة على طرف B القريب من A تكون مقيدة بالشحنة الحاثة الموجبة الموجودة على الجسم A . وعلى العكس ، فإن الشحنة المستحثة الموجبة البعيدة عن A هي شحنة حرة . فلو أننا وصلنا طرف B البعيد بالأرض كما في شكل (٧ ـ ٢) فإن الشحنة على هذا الطرف تتسرب إلى الأرض بينما تظل الشحنة السالبة القريبة من الجسم A موجودة على B حيث أنها مقيدة بالشحنة الحاثة على A .



شكل (٧ ـ ٢)



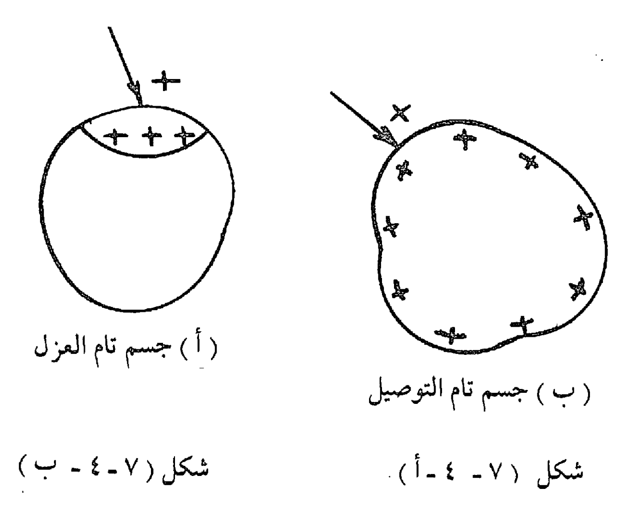
شكل (٧ - ٣)

نفرض الآن أن الجسم B قد عزل عن الأرض مرة أخرى ثم أبعد عن الجسم A . عندئذ تتحرك الشحنة المستحثة السالبة الموجودة على الجسم B وتنتشر عليه كله ، وبذلك يكون قد تم شحن الجسم B عن طريق الحث (شكل ٧ - ٣) .

٧ - ٣ توزيع الشحنة الكهربية على الموصلات والعوازل :

عندما يُعطي جسم عازل شحنة كهربية فإن هذه الشحنة تظل مرتبطة بالمنطقة من الجسم الملامسة للجسم الشاحن ، ولا يمكن لهذه الشحنة أن تنتشر خارج منطقة التلامس (شكل ٧ - ٤ - أ) .

وعلى العكس من ذلك ، إذا أُعطي جسم تام التوصيل ومعزول شحنة كهربية عند أي جزء منه فإن هذه الشحنة تنتشر في جميع أجزاء الجسم حتى تستقر في النهاية مُوزَّعة على السطح الخارجي له بحيث لا توجد أية شحنة داخل الجسم التام التوصيل (شكل ٧ - ٤ - ب) .



شكل (٧ - ٤ - ب)   شكل (٧ - ٤ - أ)

٧ ـ ٤ القوة بين شحنتين ـ قانون كولوم :

لقد أثبت كولوم ـ في حوالي عام ١٧٨٠ ـ من خلال التجارب التي أجراها الحقائق التالية :

١ ـ إذا وُضعت شحنتان في الفراغ (أو الهواء) بينهما مسافة محدودة تتولد بينهما قوة تجاذب إذا كانتا مختلفتين وقوة تنافر إذا كانتا متشابهتين .

٢ ـ يتناسب مقدار هذه القوة مع مقدار كل من الشحنتين وعكسياً مع مربع المسافة بينهما ، أي أن (أنظر شكل ٧ ـ ٥) .

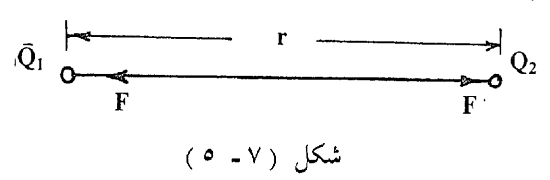
$$F = K \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \qquad (7 - 1)$$

حيث :

F : مقدار القوة بين الشحنتين Q_1 و Q_2 .

r : مقدار المسافة بينهما .

K : ثابت .



شكل (٧ ـ ٥)

نلاحظ في العلاقة (1 - 7) أن وحدات الطرف الأيسر هي وحدة قوة (نيوتون) بينما وحدات الطرف الأيمن هي مربع وحدة الشحن على مربع وحدة الأطوال . ولكي تتطابق الأبعاد على جانبي المعادلة فإن الشحنة الكهربية يلزم أن تكون كمية أساسية مثل الطول والكتلة والزمن ، ووحدتها هي الكولوم .

يمكن الآن تعريف وحدة الشحن (الكولوم) كما أتفق عليه عالمياً كما يأتي :

« الكولوم هو مقدار الشحنة التي حينما توضع في الفراغ على بعد متر واحد من شحنة مشابهة لها تماماً تتولد بين الشحنتين قوة تنافر مقدارها ٩ × ١٠^٩ نيوتون » . أي أنه عندما :

$$Q_1 = Q_2 = 1 \text{ Coulomb}, \; r = 1 \text{ meter}$$

$$\therefore \; F = 9 \times 10^9 \text{ Newton.}$$

وبالتعويض في المعادلة (1 - 7) :

$$9 \times 10^9 = K \frac{1 \times 1}{1^2}$$

$$K = 9 \times 10^9 \quad N.m^2 / C^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7 - 2)$$

لوحظ عند وضع الشحنتين في أي وسط آخر غير الفراغ أن مقدار القوة بينهما يقل . وعلى هذا الأساس فإنه أمكن القول بأن كل وسط له ثابت خصائصي معين يتناسب عكسياً مع مقدار القوة المتولدة . يسمى هذا الثابت بسماحية الوسط (Permittivity) ويرمز له بالرمز ϵ_0 للفراغ وفي النظام S.I. الدولي يرتبط الثابت ϵ_0 بالثابت K بالعلاقة :

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4 \pi K} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7 - 3)$$

وتصبح المعادلة (1 - 7) على الصورة :

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4 \pi \epsilon_0 r^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7 - 4)$$

وقيمة ϵ_0 نحصل عليها كما يأتي :

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4 \pi \times 9 \times 10^9}$$

$$= 8.854 \times 10^{-12} \quad C^2 / N.m^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7 - 5)$$

لأي وسط آخر غير الفراغ له سماحية ϵ (أكبر عادة من ϵ_0) نفرض العلاقة بين ϵ و ϵ_0 على الصورة :

$$\epsilon = \epsilon_r \, \epsilon_0 \qquad \cdots\cdots (7-6)$$

حيث ϵ_r هو ثابت يعتمد على الوسط ، ويسمى بالسماحية النسبية ، وللهواء تكون $\epsilon_r \simeq 1$. وعلى ذلك تأخذ العلاقة (4 - 7) الصورة التالية لأي وسط :

$$F = \frac{Q_1 \, Q_2}{4 \, \pi \, \epsilon_0 \, \epsilon_r \, r^2} \; N \qquad \cdots\cdots (7-7)$$

٧ ـ ٥ الصورة الاتجاهية لقانون كولوم :

حيث أن القوة المتولدة بين شحنتين هي كمية متجهة فيلزم تحديد مقدارها واتجاهها عند التعبير عنها . وعلى ذلك فيمكن كتابة المعادلة (7 - 7) على الصورة الاتجاهية التالية :

$$F = \frac{Q_1 \, Q_2}{4\pi \, \epsilon_0 \, \epsilon_r \, r^2} \; \bar{a}_r \qquad \cdots\cdots (7-8)$$

حيث $\bar{a}_r$ هو متجة الوحدة في اتجاه الخط الواصل بين الشحنتين (شكل ٧ ـ ٦) .

شكل (٧ ـ ٦)

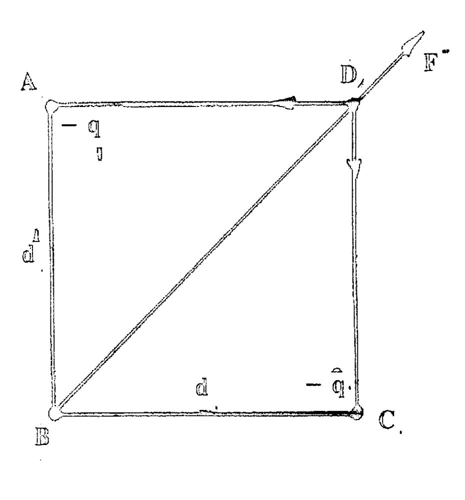
٧ ـ ٦ أمثلة :

مثال ٧ : ١

وُضعت شحنتان قيمة كل منهما Q في ركنين متقابلين من مربع . ما

هي قيمة الشحنة q التي يجب أن توضع في كل من ركني المربع الأخريين وذلك لكي تنعدم القوة المؤثرة على كل من الشحنتين Q و Q؟

بالرجوع لشكل (٧ - ٧) ، القوة المؤثرة على نقطة B نتيجة للشحنة Q الموجودة عند D هي القوة F في اتجاه DB .



شكل (٧ - ٧)

$$F = \frac{Q^2}{4\pi \epsilon_0(\sqrt{2}\, d)^2}$$

$$= 4.5 \times 10^9 \frac{Q^2}{d^2}\ \text{N.}$$

لكي تنعدم القوة F عند وضع الشحنتين q, q يجب أن تولد هاتان الشحنتان معاً قوة عند D تكون مساوية للقوة F في المقدار ومضادة لها في الاتجاه . وبذلك يجب أن تكون الشحنة q سالبة . محصلة القوتين الناتجتين عند D من الشحنتين q, − q − هي :

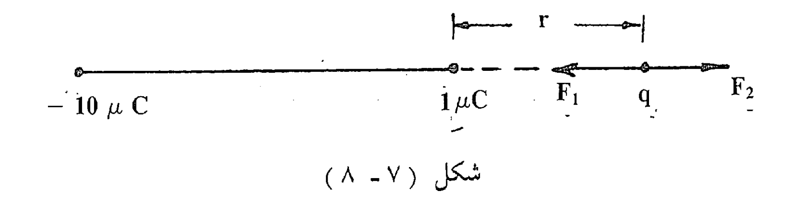
$$\sqrt{2}\,[\,\frac{q\,Q}{4\pi \epsilon_0\, d^2}\,] = F$$

$$\therefore q = \frac{Q}{2\sqrt{2}} \quad C.$$

مثال ٧ : ٢

وضعت شحنتان $1\ \mu c,\ 10\ \mu c -$ على بعد 5 Cm. من بعضهما .
عين موضع النقطة التي لا تتولد عندها قوة على شحنة ثالثة q .

النقطة المطلوبة تقع على الخط الواصل بين النقطتين . ونظراً لأن الشحنتين مختلفتان فإن هذه النقطة يجب أن تقع خارج الشحنتين من ناحية الشحنة الصغرى . لنفرض أن النقطة المطلوبة تقع على بعد r من الشحنة $1\ \mu c$.



شكل (٧ - ٨)

$$F_2 - F_1 = 0$$

$$\frac{1 \times 10^{-6}\, q}{4\pi\, \epsilon_0\, r^2} - \frac{10 \times 10^{-6}\, q}{4\pi\, \epsilon_0\, (r + 0.05)^2} = 0$$

ومنها ينتج :

$r = 0.0232$ meters.

٧ - ٧ المجال الكهربي Electric Field :

المجال الكهربي هو المنطقة المحيطة بالشحنة التي يظهر فيها أثر هذه الشحنة . ويظهر أثر الشحنة على صورة قوة على أية شحنة أخرى توضع في هذا المجال . والمجال الكهربي هو أحد مجالات القوى أي تلك التي يظهر

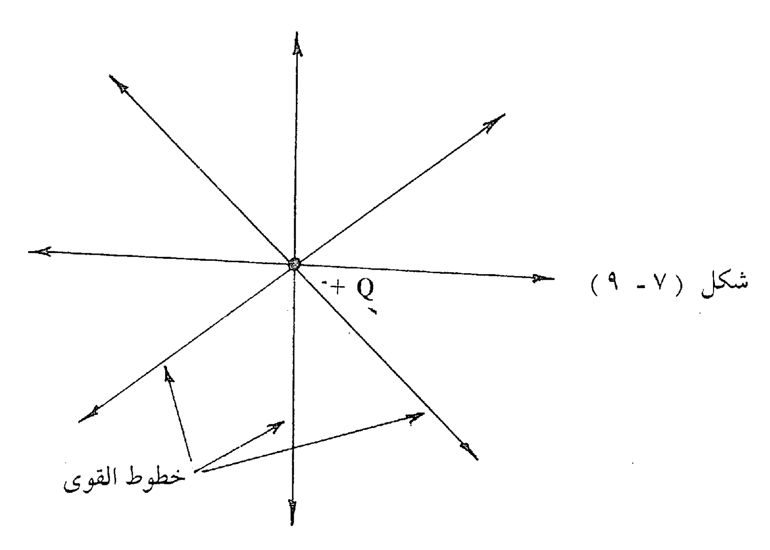
فيها أثر المجال على شكل قوة جذب أو طرد . ومن أمثلة مجالات القوى المجال المغناطيسي ومجال الأرض .

٧ ـ ٨ الفروض الأساسية :

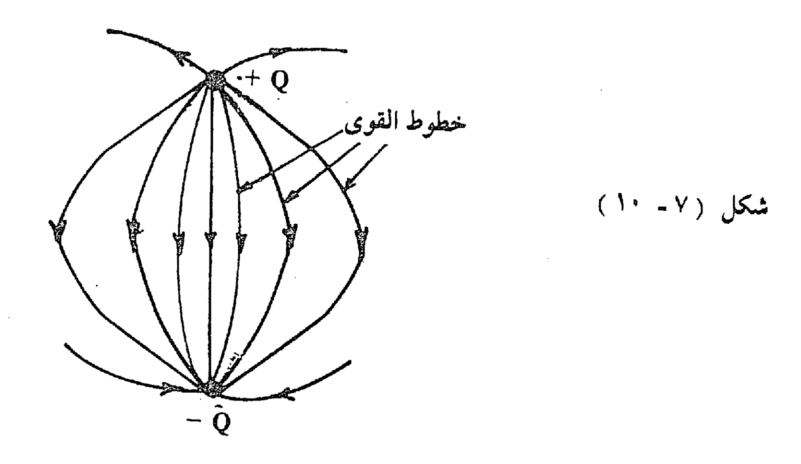
لإمكان دراسة المجال الكهربي وجد العلماء أنه يجب وضع بعض الفروض الأساسية التي يمكن بواسطتها تفسير الظواهر المختلفة للمجال . وقد أمكن عن طريق هذه الفروض وضع العلاقات والقوانين التي تصف خواص المجال الكهربي وصفاً كاملاً . وهذه الفروض هي :

٧ ـ ٨ ـ ١ خطوط القوى Lines of Force :

نظراً لأن المجال الكهربي يظهر على شكل قوة تؤثر على الشحنة الكهربية فإن ذلك يستتبع فرض شكل تخطيطي في منطقة هذا المجال يبين اتجاه هذه القوة دون مقدارها في أي نقطة . فالشحنة النقطية مثلاً (Point Charge) تظهر خطوط القوى حولها على شكل خطوط شعاعية كما هو موضح بالشكل (٧ ـ ٩) ، ويبين السهم اتجاه القوة . وخطوط القوى الناتجة عن شحنتين متساويتين في المقدار ومختلفتين في العلامة هي كما في الشكل (٧ ـ ١٠) .

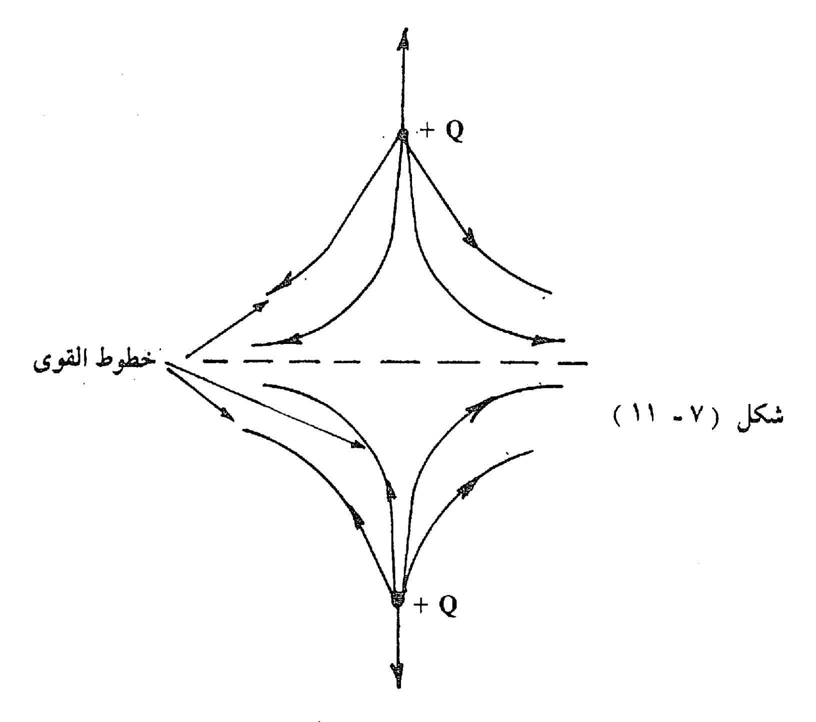


شكل (٧ ـ ٩)



شكل (٧- ١٠)

ويبين الشكل (٧ ـ ١١) خطوط القوى الناتجة عن شحنتين متساويتين في المقدار ومتشابهتين في العلامة . ويجب ملاحظة ما يأتي :



شكل (٧- ١١)

(أ) خطوط القوى هي خطوط وهمية تُفرض لتوضيح اتجاه قوة المجال عند أي نقطة .

(ب) اتجاه قوة المجال عند أي نقطة هو اتجاه المماس لخط القوة عند هذه النقطة .

(جـ) خطوط القوى تنبع دائماً من الشحنة الموجبة وتدخل دائماً إلى الشحنة السالبة .

(د) تخترق خطوط القوى أي سطح موصل في اتجاه عمودي على هذا السطح .

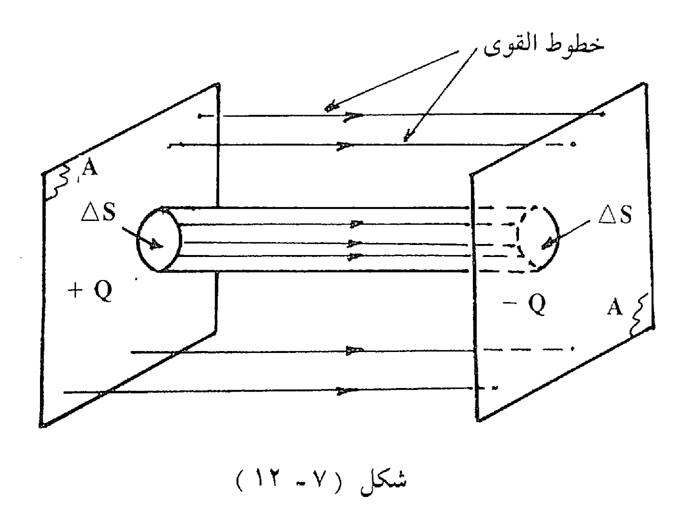
٧ - ٨ - ٢ الفيض - أنابيب الفيض Flux - Tubes of Flux :

فرض فاراداي أن أي شحنة كهربية يفيض عنها فيض كهربي مساوٍ لتلك الشحنة - ويمكن تصور هذا الفيض الكهربي عن طريق تشبيهه بفيض ماء ثابت يفيض باستمرار من منبع لتلك الماء . ونظراً لأن الفيض الكهربي ينتشر في الفراغ بمجرد خروجه من منبعه (الشحنة الكهربية) فقد اقترح فاراداي توزيع هذا الفيض الكهربي داخل أنابيب (كما في حالة الماء تماماً) سماها أنابيب الفيض . وتقدر شدة أي أنبوبة بمقدار الفيض الكهربي داخلها وهو - كما سبق - يساوي مصدر هذا الفيض أي الشحنة الموجودة على نهايتيها .

لتوضيح فكرة أنابيب الفيض اعتبر مجالاً كهربياً ناشئاً بين لوحين معدنيين مستويين مساحة كل منهما A كما هو موضح بالشكل (٧ - ١٢) . الشحنة الكلية على أحد اللوحين Q + وعلى اللوح الآخر Q − وهما موزعان بإنتظام على سطح اللوح .

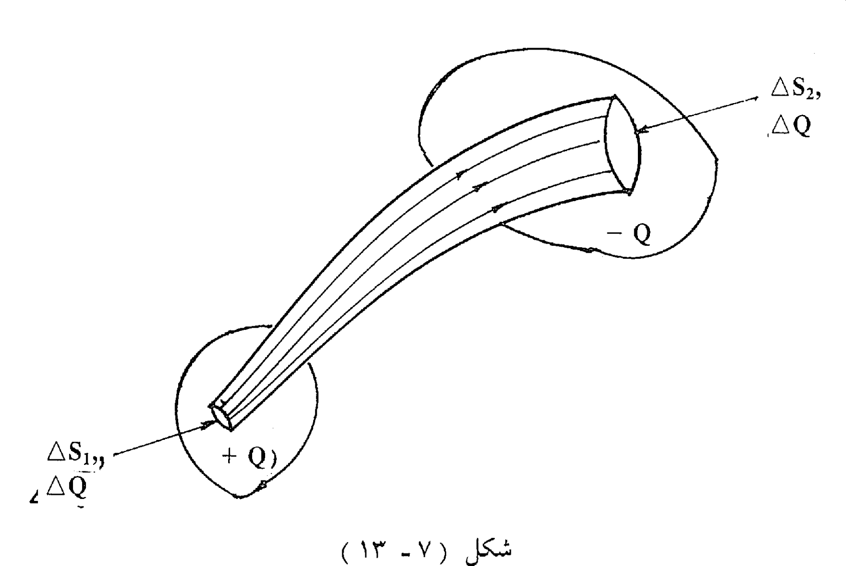
لو اعتبرنا مساحة صغيرة ΔS فإن هذه المساحة تحتوي على شحنة مقدارها $(\Delta S . \frac{Q}{A})$ ، وهكذا ينبع من هذه المساحة فيض كهربي داخل أنبوبه فيض شدتها $(\Delta S . \frac{Q}{A})$. هذه الأنبوبة تحتوي داخلها على عدد ثابت

من خطوط القوى لا يتغير من بداية الأنبوبة إلى نهايتها .



شكل (٧ - ١٢)

يبين شكل (٧ - ١٣) أنبوبة فيض تصل بين سطحين . مقدارا الشحنتين على طرفي الأنبوبة متساويان إلا أن مقطع سطح الأنبوبة العمودي على خطوط القوى غير ثابت .



شكل (٧ - ١٣)

مما تقدم يمكن فرض الآتي :

(أ) أي شحنة كهربية Q ينبع منها فيض كهربي Ψ مقداره مساوياً تماماً لمقدار هذه الشحنة الكهربية ، أي أن :

$$\Psi = Q \qquad (7 - 9)$$

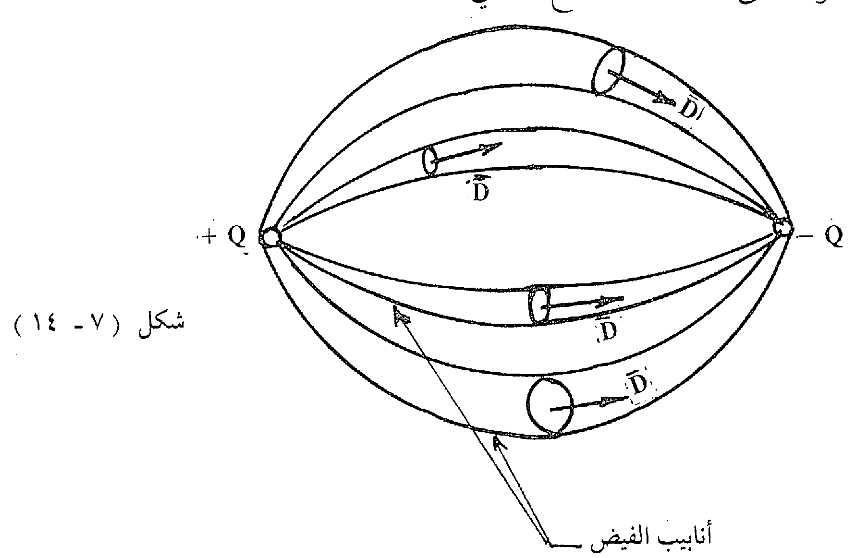
(ب) وحدة أنابيب الفيض هي الفرداي ، وهي شدة أنبوبة الفيض التي تنبع من شحنة كهربية موجبة مقدارها كولوم واحد .

(جـ) وحدة أنابيب الفيض تحتوي على عدد معين من خطوط القوى يساوي ϵ ، حيث ϵ هي سماحية الوسط المار فيه أنبوبة الفيض .

(د) نستنتج من الفرض جـ أن عدد خطوط القوى الناتج من شحنة مقدارها Q يساوي $\frac{Q}{\epsilon}$.

٧ ـ ٨ ـ ٣ كثافة الفيض Flux Density :

إذا احتوت أنبوبة الفيض فيضاً مقداره Ψ فإن كثافة الفيض D عند أي مقطع للأنبوبة مساحته S هو مقدار الفيض المار عمودياً على هذا المقطع ، مقسوماً على مساحة المقطع ، أي أن :



شكل (٧- ١٤)

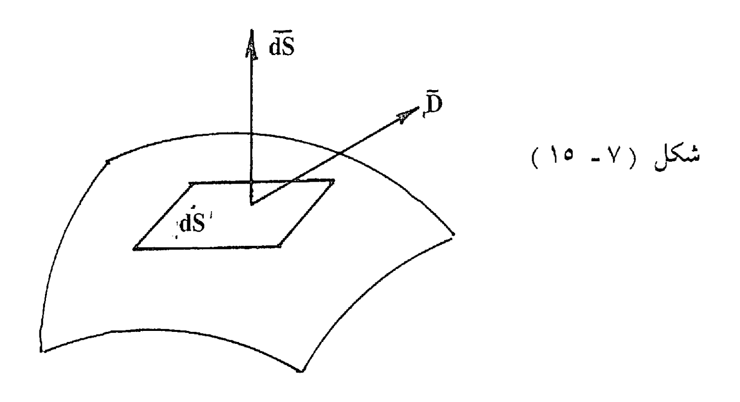
$$D = \frac{}{S}\Psi / m^2 \quad \text{.......} \quad (7 - 10)$$

وبصورة عامة ، إذا كان توزيع الفيض غير منتظم على المساحة فإن :

$$\Psi = \int_s \int \bar{D}.\, \bar{dS} \quad \text{.......} \quad (7 - 11)$$

$$\Psi = \int_s \int D_n \, dS \quad \text{.......} \quad (7 - 12)$$

حيث D_n هي المركبة من D العمودية على المساحة dS ، أي المنطبقة على متجه المساحة $\bar{dS}$ كما هو موضح بالشكل (٧ـ ١٥) .



شكل (٧ـ ١٥)

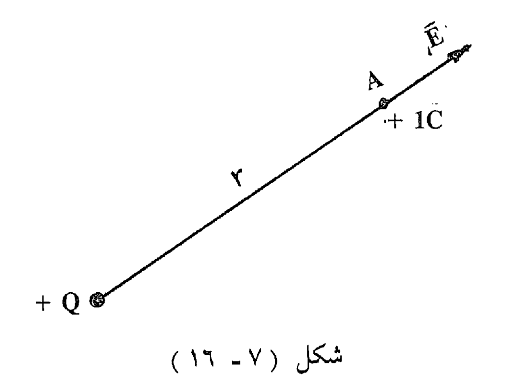
يتضح من المعادلة (11 - 7) أن الفيض الكهربي خلال أي سطح هو تكامل كثافة الفيض على هذا السطح . بالرجوع إلى شكل (٧ـ ١٤) ، لو تصورنا أن كل الفراغ مملوء بأنابيب فيض تصل بين الشحنتين Q + و Q − فإن الفيض الكلي الواصل بين الشحنتين يجب أن يساوي Q ، ونحصل عليه بإجراء التكامل على مستوى لا نهائي يفصل بين الشحنتين أي أن :

$$\Psi = \int_{\text{مستوى لا نهائي}} \int \bar{D}.\bar{dS} = Q \quad \text{.......} \quad (7 - 13)$$

من الشرح السابق يتبين أن كثافة الفيض هو متجه عمودي دائماً على المقطع العمودي على أنبوبة الفيض .

٧ ـ ٩ شدة المجال الكهربي Electric Field Intensity:

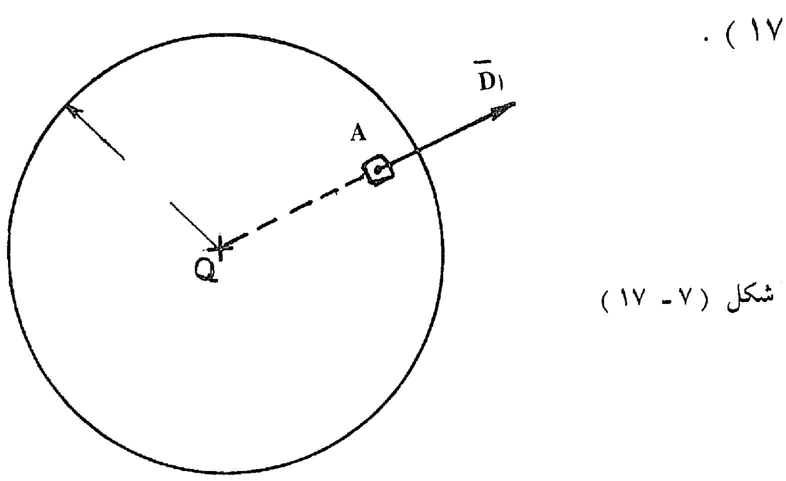
شدة المجال الكهربي عند نقطة ما هي مقدار القوة المؤثرة على وحدة الشحن النقطية الموجبة الموضوعة عند هذه النقطة . ويحدد اتجاهَ هذه القوة اتجاهُ المماس لخط القوة عند هذه النقطة . بالإشارة إلى الشحنة النقطية الموجبة المبينة بالشكل (٧ ـ ١٦) فإن شدة المجال الكهربي في الفراغ عند نقطة مثل A على بعد مسافة r من Q هي القوة المؤثرة على شحنة موجبة مقدارها ١ كولوم ، أي أن :



شكل (٧ ـ ١٦)

$$E = \frac{Q}{4 \pi \epsilon_0 r^2} \qquad \text{.........} \qquad (7 - 14)$$

نعتبر الآن سطحاً كروياً يمر بنقطة A ويحيط بالشحنة Q + (شكل ٧ ـ ١٧) .



شكل (٧ ـ ١٧)

الفيض الكلي الناتج من الشحنة Q هو :

$$\Psi = Q$$

ومن تماثل الشكل فإن كثافة الفيض D تكون ثابتة على هذا السطح ، وتُعطى بالعلاقة :

$$D = \frac{\Psi}{4\pi r^2} = \frac{Q}{4\pi r^2} \quad \ldots\ldots (7 - 15)$$

بمقارنة المعادلتين (14 - 7) و (15 - 7) نجد أن :

$$\bar{D} = \epsilon_0 \bar{E} \quad \ldots\ldots (7 - 16)$$

المعادلة (16 - 7) تبين العلاقة العامة بين كثافة الفيض وشدة المجال الكهربي عند أي نقطة ، أي أن :

$$\bar{E} = \frac{\bar{D}}{\epsilon_0} \quad \ldots\ldots (7 - 17)$$

ولأي وسط آخر غير الفراغ :

$$\bar{E} = \frac{\bar{D}}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{\bar{D}}{\epsilon} \quad \ldots\ldots (7 - 18)$$

وتبعاً للعلاقة (18 - 7) فيمكن تعريف شدة المجال الكهربي عند أي نقطة بأنه يساوي كثافة الفيض عند هذه النقطة مقسوماً على سماحية الوسط الموجود به هذه النقطة .

نعتبر الآن مساحة صغيرة ds يمر بها فيض مقداره $d\Psi$. هذا الفيض يحتوي على عدد من خطوط القوى مقداره $\frac{d\Psi}{\epsilon}$ (أنظر الفقرة جـ من البند ٧ ـ ٨ ـ ٢) .

وعلى ذلك :

عدد خطوط القوى المار عمودياً بالمساحة ds = $\frac{d\Psi}{\epsilon}$

كثافة الفيض على المساحة ds = $\frac{d\Psi}{ds}$

شدة المجال عند المساحة ds (من المعادلة 18 - 7) =

$$\frac{d\Psi}{\epsilon ds} = \frac{D}{\epsilon}$$

أي أن شدة المجال

= $\frac{\text{عدد خطوط القوى العمودية على المساحة ds.}}{ds}$

وبذلك يمكن تعريف شدة المجال عند نقطة بأنه يساوي عدد خطوط القوى المار عمودياً على وحدة المساحات المارة بهذه النقطة .

٧ ـ ١٠ أمثلة :

مثال ٧ : ٣

عين مقدار شدة المجال الكهربي الرأسي الذي يلزم أن يؤثر على الكترون لكي يمنعه من السقوط في الهواء . كتلة الالكترون ٩,١ × ١٠^-٣١ كجم وعجلة الجاذبية ٩,٨ متر / ث^٢ وشحنة الالكترون ١,٦ × ١٠^-١٩ كولوم .

نفرض أن شدة المجال المطلوب هي E .

القوة المؤثرة على الالكترون هي :

i ـ وزنه :

$$mg = 9.1 \times 10^{-31} \times 9.8$$

ii ـ قوة المجال الكهربي :

$$F = E.e$$

$$= E.\ 1.6 \times 10^{-19}$$

وبمساواة القوتين ينتج :

$$E = 5.6 \times 10^{-11}\ N/C.$$

مثال ٧ : ٤

وُضعت ثلاث شحنات نقطية في مستوى على النحو التالي :

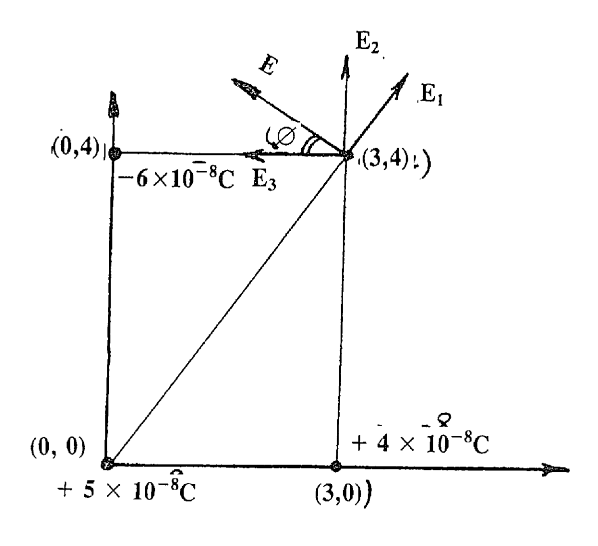
i ـ شحنة مقدارها + ٥ × ١٠$^{-٨}$ كولوم عند النقطة (0 ، 0) متر .

ii ـ شحنة مقدارها + ٤ × ١٠$^{-٨}$ كولوم عند النقطة (0 ، 3) متر .

ii ـ شحنة مقدارها − ٦ × ١٠$^{-٨}$ كولوم عند النقطة (4 ، 0) متر .

عين شدة المجال الكهربي عند النقطة (4 ، 3) متر .

بالإشارة إلى شكل (٧ ـ ١٨) .



شكل (٧ ـ ١٨)

$$E_1 = 9 \times 10^9 \times 5 \times 10^{-8} / 5^2 = 18 \text{ N / C.}$$

$$E_2 = 9 \times 10^9 \times 4 \times 10^{-8} / 4^2 = 22.5 \text{ N/ C.}$$

$$E_3 = 9 \times 10^9 \times 6 \times 10^{-8} / 3^2 = 60 \text{ N/ C.}$$

ولإيجاد شدة المجال المحصل نوجد المركبتين الأفقية والرأسية :

$$E_x = E_1 \cos \theta - E_3 = - 49.2$$

$$E_y = E_1 \sin \theta + E_2 = 36.9$$

$$E = \sqrt{(- 49.2)^2 + (36.9)^2} = 61.5 \text{ N/ C.}$$

$$\tan \varnothing = 36.9 / 49.2 = 0.75$$

$$\varnothing = 36.9°$$

٧ ـ ١١ الجهد الكهربي Electrical Potential :

الجهد الكهربي عند نقطة هو مقياس للحال الكهربية لهذه النقطة . وهو يعطي أيضاً مقياساً للطاقة المختزنة في المجال حتى هذه النقطة .

يُعرَّف جهد أي نقطة بأنه يساوي الشغل المبذول على وحدة الشحن النقطية الموجبة الذي يلزم بذله ضد قوى المجال لاحضار هذه الشحنة من خارج المجال الكهربي حتى موضع النقطة المعنية .

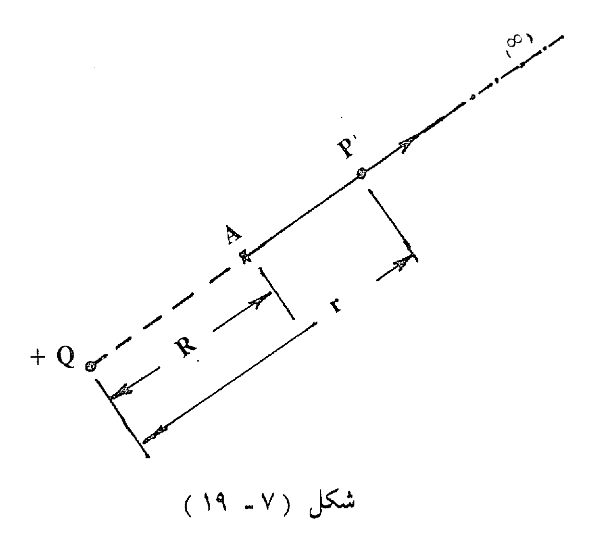
ويُقصد بالتعبير « خارج المجال الكهربي » المنطقة التي ينعدم فيها المجال الكهربي. لايجاد الجهد الكهربي لنقطة A تبعد مسافة R عن شحنة نقطية موجبة Q (شكل ٧ ـ ١٩) . باتباع تعريف الجهد ، فإن المجال الكهربي عند أي نقطة عامة مثل P تبعد مسافة r عن Q هو :

$$E = \frac{Q}{4 \pi \epsilon r^2}$$

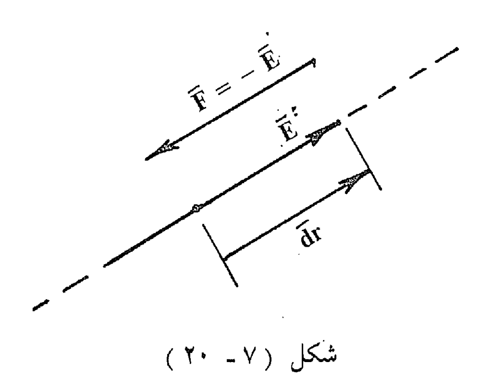
ويمتد هذا المجال نظرياً حتى $r = \infty$ وهي المنطقة التي ينعدم فيها

المجال . وعلى ذلك فإن جهد النقطة A تبعاً للتعريف هو V_A حيث :

$$V_A = \int_{r=\infty}^{r=R} - \bar{E} . d\bar{r} \quad \text{.............} \quad (7 - 19)$$



شكل (٧ ـ ١٩)



شكل (٧ ـ ٢٠)

والإشارة السالبة وُضعت لأن الشغل ضد قوة المجال . ونظراً لأن $\bar{E}$ منطبقة على $d\bar{r}$ (شكل ٧ ـ ٢٠) فإن المعادلة (19 - 7) تصبح :

$$V_A = \int_{r=\infty}^{r=R} - \frac{Q}{4 \pi \epsilon r^2} \; dr$$

$$= \left[\frac{Q}{4 \pi \epsilon r} \right]_{r=\infty}^{r=R}$$

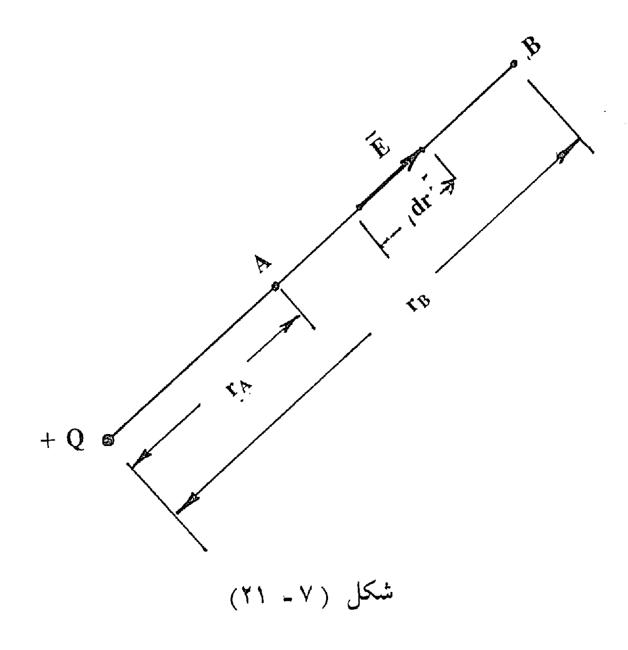
$$V_A = \frac{Q}{4\pi \in R} \quad \text{...} \quad (7 - 20)$$

ونلاحظ أن الجهد كمية قياسية ليس لها اتجاه . ويسمى V_A بالجهد المطلق لنقطة A .

٧ ـ ١٢ فرق الجهد Potential Difference :

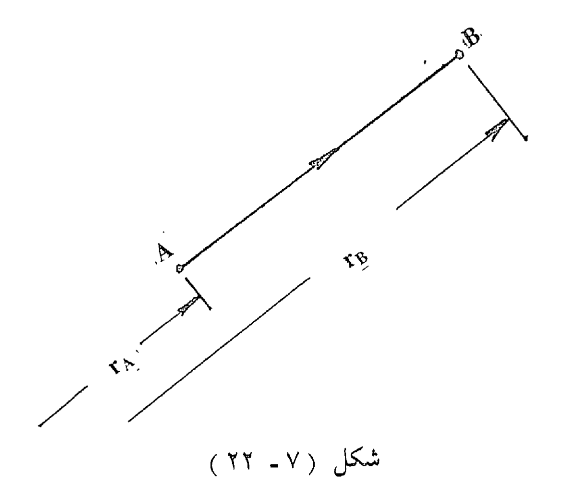
لو انتقلت وحدة الشحن النقطية الموجبة من نقطة في المجال مثل B إلى نقطة أخرى مثل A فإن الشغل المبذول في هذا الانتقال ضد قوة المجال هو الفرق في الجهد بين نقطة A ونقطة B . فإذا كانت قيمة هذا الشغل المبذول موجبة فإن جهد A يصبح أعلا من جهد B ، وعلى العكس إذا كانت قيمة الشغل سالبة فإن جهد A يكون أدنى من جهد B . أي أن :

$$V_{A-B} = V_A - V_B = \int_B^A - \bar{E}.d\bar{r} \quad \text{...............................} \quad (7 - 21)$$



شكل (٧ ـ ٢١)

فلحساب فرق الجهد بين نقطتين A و B (شكل ٧ ـ ٢٢) .



شكل (٧- ٢٢)

$$V_{A-B} = V_A - V_B = \int_{rB}^{rA} - \frac{Q}{4\pi \epsilon r^2} \, dr$$

$$= \left[\frac{Q}{4\pi \epsilon r} \right]_{rB}^{rA}$$

$$= \frac{Q}{4\pi \epsilon} \left[\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7 - 22)$$

وهو كمية موجبة ؛ أي أن جهد A أعلا من جهد B . ونلاحظ أنه في المعادلة (22 - 7) لو وصلت B إلى اللانهاية نحصل على الجهد المطلق لنقطة A المعطي بالمعادلة (20 - 7) . كما نلاحظ أن :

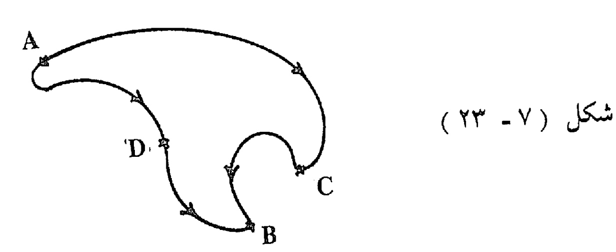
$$V_{AB} = - V_{BA} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7 - 23)$$

٧ـ ١٣ المجالات المحافظة **Conservative Fields** :

لأي مجال للقوة ، إذا كان الشغل من قوة المجال للإنتقال من نقطة معينة والرجوع إلى نفس النقطة على أي مسار مقفل يساوي الصفر فإن هذا المجال يسمى مجالاً محافظاً . وعلى سبيل المثال فإن مجال جذبْ الأرض مجال محافظ لأنه إذا تحرك جسم ابتداء من نقطة معينة على أي مسار في مجال جذب

الأرض ثم عاد إلى نفس نقطة البداية فإن الشغل المبذول من قوة جذب الأرض (الوزن) يساوي الصفر . أي أن الجسم لم يفقد أو يكتسب أية طاقة . ولهذا يسمى هذا المجال مجالاً محافظاً .

والمجال الكهربي بطبيعته مجال محافظ بمعنى أنه لو انتقلت شحنة كهربية على المنحنى المقفل ADBCA المبين بشكل (٧ - ٢٣) فإن الشغل المبذول في هذا الإنتقال ضد قوى المجال يساوي الصفر . وعلى ذلك :



شكل (٧ - ٢٣)

$$W_{ACB} + W_{BDA} = 0$$

$$W_{ACB} = - W_{BDA}$$

$$W_{ACB} = W_{ADB} \qquad (7 - 24)$$

المعادلة (24 - 7) تبين خاصية أساسية للمجالات المحافظة وهي أن الشغل المبذول بين نقطتين لا يعتمد على المسار بين هاتين النقطتين . ولأي مجال ، لكي يمكن تعريف جهد النقطة (أو فرق الجهد بين نقطتين) يجب أن يكون هذا الجهد وحيد القيمة ، أي يجب أن يكون المجال محافظاً . بالإشارة إلى شكل (٧ - ٢٤) .

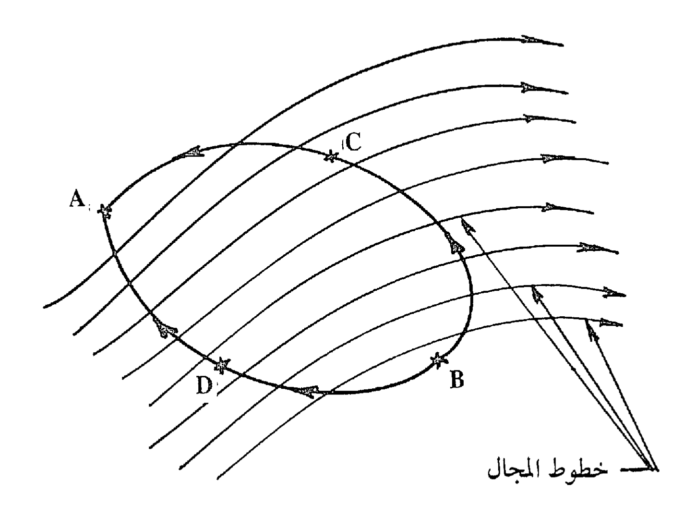
$$V_{A-B} = V_A - V_B$$

$$= \int_B^A - \bar{E}.d\bar{r}$$

ويمكن إجراء هذا التكامل على أي مسار اختباري ، فمثلاً :

$$V_{A-B} = \int_B^C - \bar{E}.d\bar{r} + \int_C^A - \bar{E}.d\bar{r}$$

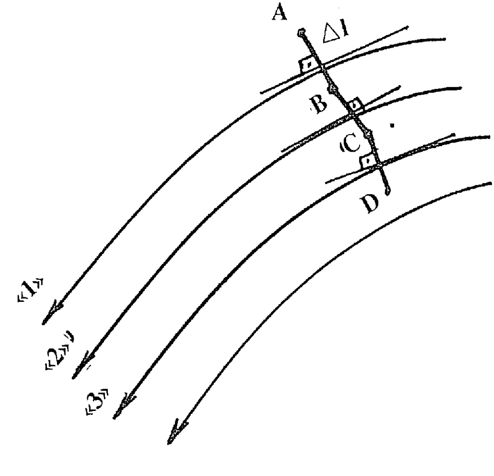
$$= \int_B^D - \bar{E}.d\bar{r} + \int_D^A - \bar{E}.d\bar{r} \qquad (7 - 25)$$



شكل (٧ـ ٢٤)

٧ ـ ١٤ سطوح الجهد المتساوي Equi - Potential Surfaces :

لو اعتبرنا مجالاً كهربياً مبيناً بخطوط القوى كما في شكل (٧ ـ ٢٥). لنفرض أن شحنة قد انتقلت إنتقالاً صغيراً $\triangle l$ من A إلى B في اتجاه عمودي على خط القوة «1». نظراً لأن الإزاحة عمودية على قوة المجال يتلاشى الشغل المبذول، أي أن :



شكل (٧ـ ٢٥)

$$V_{A-B} = V_A - V_B = \int_B^A - \bar{E}.d\bar{l} = 0$$

$$V_B = V_A$$

وبنفس الطريقة ، لو انتقلت الشحنة من B إلى C عمودياً على خط القوة «2» فإن :

$$V_C = V_B = V_A$$

وهكذا ، بالإنتقال المستمر في مسار عمودي على خطوط القوى يمكن الحصول على منحنى (سطح في الفراغ) لا يتغير الجهد على أية نقطة عليه . يسمى هذا السطح بسطح الجهد المتساوي .

لو فرضنا الآن أن الشحنة قد بدأت الإنتقال من نقطة أخرى مثل A1 وبنفس الطريقة السابقة . سوف نحصل بذلك على سطح جهد متساوي آخر جهد جميع نقطة يساوي V_{A1} .

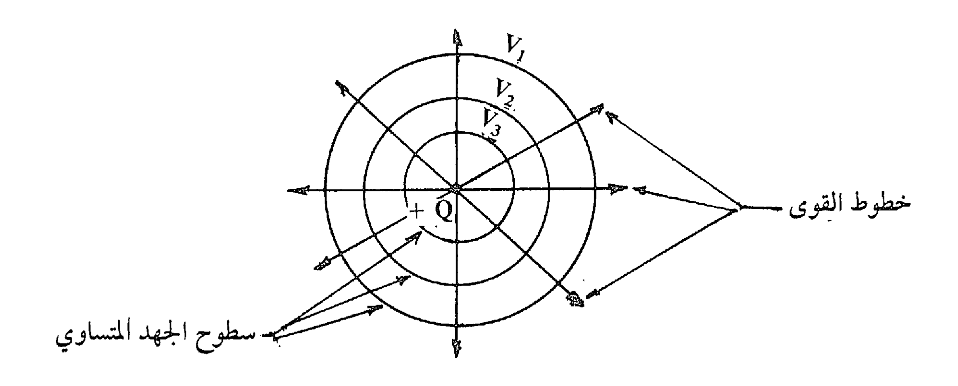
يتضح مما سبق أن المجال الكهربي يتميز برسم تخطيطي يحتوي على :

(أ) خطوط القوى ، وهي تبين اتجاه قوى المجال .

(ب) سطوح الجهد المتساوي ، وهي تبين المحلات الهندسية للنقط في الفراغ ذات الجهد المتساوي .

وتقطع خطوط القوى دائماً سطوح الجهد المتساوي على التعامد .

يبين شكل (٧ ـ ٢٦) خطوط القوى وسطوح الجهد المتساوي لمجال شحنة نقطية موجبة . فرق الجهد بين أي نقطة على السطح B وأي نقطة على السطح A هو :



شكل (٧- ٢٦)

$$V_{A-B} = V_A - V_B$$

٧ ـ ١٥ جهد الأرض ـ التأريض :

Earth Potential- Earthing:

تختص الأرض بخاصية طبيعية أساسية وهي قدرتها على استقبال أو إرسال أي شحنة كهربية دون تغير في جهدها مهما كبرت قيمة هذه الشحنة . ويرجع ذلك إلى أن الأرض جسم موصل لا نهائي الحجم من الناحية العملية .

فلو فرضنا أن جسماً موصلاً معزولاً ومشحوناً بشحنة Q والجهد على سطحه هو V قد وُصِّل بالأرض . عندئذ تنتقل الشحنة Q إلى الأرض ويصبح جهد الجسم مساوياً لجهد الأرض الذي لا يتغير . معنى ذلك أن جهد الأرض لا يتغير بتغير الشحنة الموجودة داخلها ، وهو يساوي جهد الأرض عندما لا توجد أية شحنة ، أي يساوي الصفر .

والقاعدة الأساسية في ذلك هو ما يأتي :

« عند توصيل أي جسم موصل بالأرض فإن جهد هذا الجسم يكون حتماً مساوياً للصفر . ولكن الشحنة الموجودة على الجسم لا تكون بالضرورة

مساوية للصفر ، وإنما تأخذ توزيعاً معيَّناً وقيمة معيَّنة بحيث يتمشى هذا مع شرط انعدام جهد الجسم » .

إن هذه الخاصية قد دعت المهندسين إلى الاستفادة منها عن طريق تأريض (توصيل بالأرض) الأجزاء المعدنية في الآلات الكهربية التي تكون معرضة للمس بواسطة الإنسان وذلك لضمان جعل جهد هذه الأجزاء مساوياً للصفر وعدم تعرض من يلمسها للصدمات الكهربية .

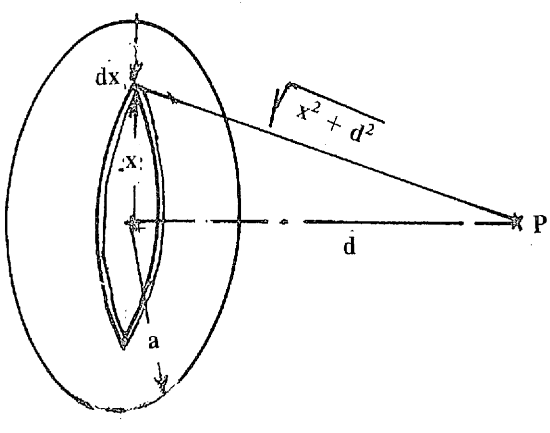
ويمكن أيضاً الاستفادة من مبدأ انعدام جهد سطح الأرض عند حساب الجهد المطلق لأي نقطة وذلك باعتبار سطح الأرض هو بداية التكامل دائماً (المعادلة 19 - 7) وليس اللانهاية حيث ينعدم المجال الكهربي دائماً داخل الأرض .

٧ - ١٦ أمثلة :

مثال ٧ : ٥

عين الجهد على نقطة P تقع على محور قرص نصف قطره a وتبعد عن مركزه مسافة d . الشحنة الكلية على القرص هي Q .

بالإشارة إلى شكل (٧ - ٢٧) .



شكل (٧ - ٢٧)

$$\text{كثافة الشحنة السطحية على القرص} = \frac{\text{الشحنة الكلية}}{\text{مساحة القرص}}$$

$$\sigma = \frac{Q}{\pi a^2}$$

نعتبر شريحة حلقية نصف قطرها x وسمكها dx . مساحة هذه الشريحة هي $2\pi\, xdx$ والشحنة عليها dq حيث :

$$dq = \sigma . 2\pi\, xdx$$

الجهد dV عند النقطة P الناتج عن تلك الشريحة هو :

$$dV = \frac{dq}{4\pi \epsilon_0 \sqrt{x^2 + d^2}}$$

$$= \frac{\sigma . 2\pi xdx}{4\pi \epsilon_0 \sqrt{x^2 + d^2}}$$

وبإجراء التكامل على القرص كله ينتج :

$$\int dV = \int_{x=0}^{x=a} \frac{\sigma . 2\pi xdx}{4\pi \epsilon_0 \sqrt{x^2 + d^2}}$$

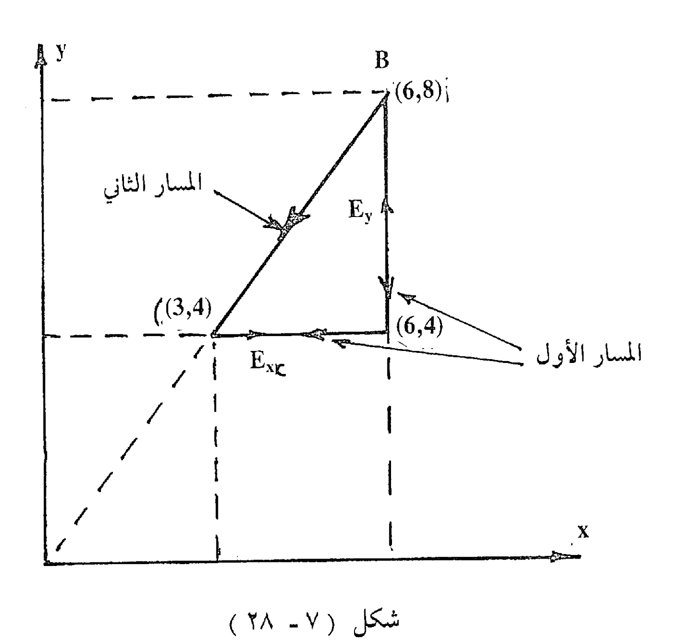
$$V = \frac{\sigma}{2 \epsilon_0} \left(\sqrt{a^2 + d^2} - d\right)$$

مثال ٧ : ٦

مجال كهربي له مركبتان في المستوى ؛ E_x أفقية و E_y رأسية . لأي نقطة في المستوى (x,y) وُجد أن :

$$E_x = Kx, \; E_y = Ky$$

حيث K ثابت . عين فرق الجهد بين النقطتين (6, 8) و (3,4) بالإشارة إلى شكل (٧ ـ ٢٨) ، نظراً لأن المجال محافظ سوف نحسب فرق الجهد كما يأتي :



شكل (٧ ـ ٢٨)

$$V_{AB} = \int_B^A -\bar{E}.d\bar{r}$$

$$= \int_B^C -\bar{E}.d\bar{r} + \int_C^B -\bar{E}.d\bar{r}$$

مع ملاحظة أن E_x لا يبذل شغلاً في الإنتقال من B إلى C وأن E_y لا يبذل شغلاً في الإنتقال من C إلى A .

$$\therefore V_{AB} = \int_{y=8}^{y=4} - Ky\,dy + \int_{x=6}^{x=3} - K dx$$

$$= [-\frac{Ky^2}{2}]_8^4 + [-\frac{Kx^2}{2}]_6^3$$

$$= 37.5K$$

ملحوظة : من الممكن حل هذه المسألة باستعمال الإحداثيات القطبية :

محصلة المجال الكلي في المستوى هو E حيث :

$$|E| = \sqrt{(Kx)^2 + (Ky)^2} = Kr$$

حيث r هي طول متجه الموضع من نقطة الأصل . وميل E على الأفقي θ حيث :

$$\tan\theta = \frac{E_y}{E_x} = \frac{y}{x}$$

أي أن المجال منطبق على r . وبإجراء التكامل من B $(r = 10)$ إلى A $(r = 5)$ على الخط AB مباشرة ينتج :

$$V_{AB} = \int_{r=10}^{r=5} - Krdr = 37.5\ K$$

٧ ـ ١٧ نظرية جاوس Gauss Theorem :

قبل تقديم نظرية جاوس نقدم مراجعة سريعة على هندسة الزاوية المجسمة . نتصور سطحاً كروياً نصف قطره r ثم نقتطع منه جزءاً صغيراً مساحته dS ثم نرسم سطحاً يصل بين محيط المساحة ds ومركز الكرة 0 كما هو موضح بالشكل (٧ ـ ٢٩) . نكون بذلك قد أنشأنا زاوية مجسمة (فراغية) $d\omega$ عند 0 مقابلة للسطح ds ، حيث :

$$ds = r^2\, d\omega \qquad (7 - 26)$$

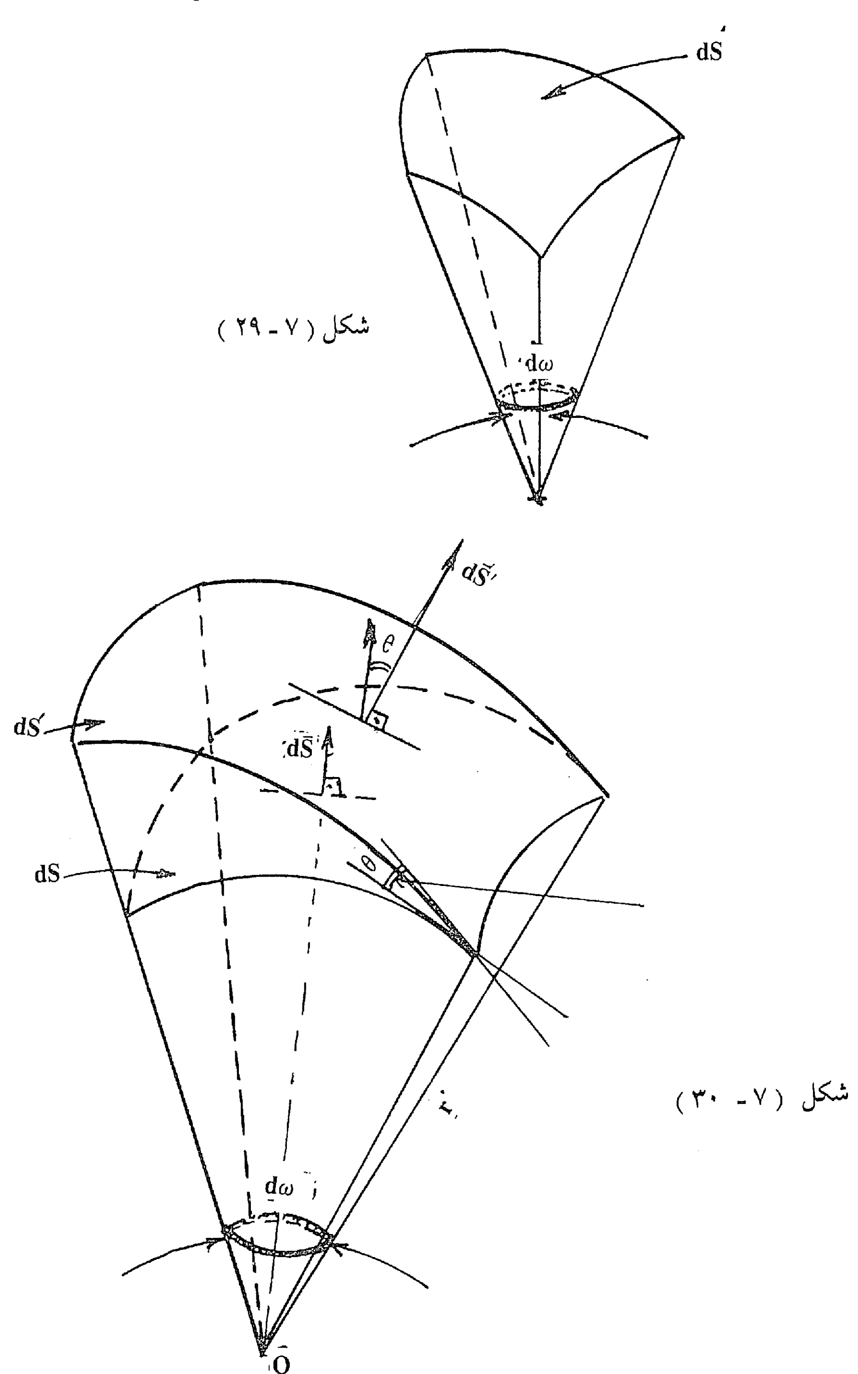
والمساحة الكلية لسطح الكرة تناظر زاوية فراغية ω ، حيث :

$$s = 4\pi r^2 = r^2 \omega$$

$$\omega = 4\pi$$

لنفرض الآن سطحاً مساحته ds' مقتطعاً من سطح مقفل غير كروي وأن ds' تحصر زاوية مجسمة $d\omega$ ـ كما في شكل (٧ ـ ٣٠) ـ وأن ds هو

الجزء من سطح الكرة المشترك مع ds' في الزاوية $d\,\omega$. نظراً لصغر كل من المساحتين ds و ds' فيمكن معاملتها على أنهما مستويتان .



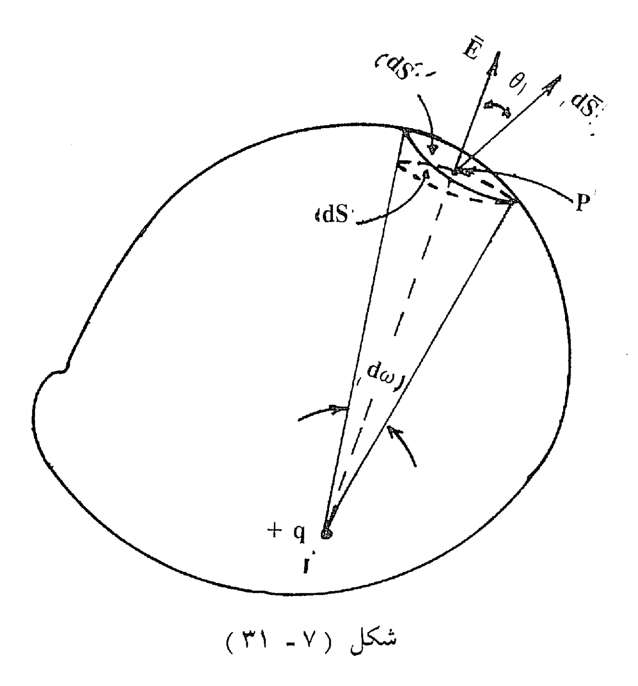
شكل (٧ - ٢٩)

شكل (٧ - ٣٠)

الزاوية θ بين ds و 'ds هي أيضاً الزاوية بين العمودين على السطحين . مسقط 'ds على سطح الكرة هو $ds' \cos \theta$. من الشكل نجد أن :

$$ds' \cos \theta = ds \quad \text{.......} \quad (7 - 27)$$

نعود الآن إلى إثبات نظرية جاوس ونعتبر شحنة q وقد أحيطت بأي سطح مقفل كما في الشكل (٧ـ ٣١) .



شكل (٧ـ ٣١)

المجال الكهربي عند أي نقطة P على السطح يحيط بها مساحة متناهية في الصغر 'ds هو :

$$E = \frac{q'}{4 \pi \epsilon r^2}$$

وهو يساوي عدد خطوط القوى العمودية على 'ds مقسوماً على المساحة ds كما تم توضيحه في البند ٧ـ ٩ .

مركّبة المجال الكهربي العمودية على ds' هي $E \cos \theta$.

عدد خطوط القوى العمودية على ds' هي $E \cos \theta . ds'$.

الفيض الكهربي المار عمودياً على ds' هو d حيث :

$$d\Psi = (E \cos \theta . ds') . \epsilon$$

$$= \frac{q}{4 \pi \epsilon r^2} (ds' \cos \theta) . \epsilon$$

$$= \frac{q}{4 \pi r^2} ds = \frac{q}{4 \pi} d \omega$$

حيث ds هي مساحة السطح المشترك على الكرة المقابل لزاوية $d\omega$.

وبإجراء التكامل على السطح المقفل كله الذي يقابل زاوية مجسمة 4π .

$$\Psi = \int d\Psi = \int_{\omega=0}^{\omega=4\pi} \frac{q}{4 \pi} d \omega$$

$$= q \quad \ldots\ldots\ldots \quad (7 - 28)$$

أي أن الفيض الكهربي العمودي على أي سطح مقفل يساوي الشحنة التي يحيط بها ذلك السطح . وبالرجوع إلى المعادلة (12 - 7) يمكن وضع نظرية جاوس على الصورة الآتية :

$$q = \oint_s \bar{D} . d\bar{s} = \oint_s D_n \, ds \quad \ldots\ldots\ldots \quad (7 - 29)$$

المعادلة (29 - 7) تنص على أن تكامل المركبة العمودية لكثافة الفيض D_n بالنسبة للمساحة على أي سطح مقفل يساوي الشحنة المحاطة بذلك السطح .

ويمكن تعميم هذه النظرية إذا كان داخل السطح أكثر من شحنة كما يأتي :

$$q_1 + q_2 + \ldots = \oint_s \bar{D}.\bar{ds} = \oint_s D_n \, ds \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7 - 30)$$

٧ ـ ١٨ استخدامات نظرية جاوس :

إن تطبيق نظرية جاوس واستخدامها لتعيين شدة المجال عند نقطة معينة يكون مفيداً إذا أمكن إجراء التكامل الموجود في المعادلة (29 - 7) بسهولة . وهذا لا يتأتّى إلا إذا توافر أحد الشرطين التاليين على الأقل :

(أ) أن تكون قيمة $\bar{D}$ واتجاهها بالنسبة لعنصر المساحة ds ثابتين على كل سطح التكامل ، كأن تكون $\bar{D}$ عمودية دائماً على $\bar{ds}$.

(ب) أن توجد علاقة ما بين كل من $\bar{D}$ و$\bar{ds}$.

وسوف نعطي فيما يلي بعض التطبيقات على نظرية جاوس .

٧ ـ ١٨ ـ ١ سطح كروي موصل مشحون :

ذكرنا في بداية هذا الباب أن الشحنات على الأجسام الموصلة تستقر على السطح الخارجي لهذه الأجسام بحيث لا توجد شحنات داخلها . وعلى ذلك فيمكن كهربياً إعتبار الكرة المصمتة تكافىء تماماً السطح الكروي المفرغ .

نعتبر الآن سطحاً كروياً مشحوناً بشحنة Q + كما في شكل (٧ـ ٣٢) . نظراً للتماثل التام حول المركز فإن المجال الناشىء يكون أيضاً متماثلاً حول المركز ، أي أن خطوط القوى تكون شعاعية . وعلى ذلك فإن سطح جاوس المناسب هو سطح كروي حتى يكون السطح عمودياً على المجال دائماً .

لنعتبر الآن نقطة مثل P تبعد مسافة $(r > a)$ ونمرر بها سطحاً كروياً

مقفلاً . أي عنصر مساحة ds على هذا السطح عمودي دائماً على E وبتطبيق المعادلة (29 - 7) ينتج :

$$Q = \oint_{\text{سطح الكرة}} \bar{D}.d\bar{s} = \oint_{\text{سطح الكرة}} D_n.ds$$

$$= \oint_{\text{سطح الكرة}} \epsilon\ E\ ds = \epsilon_0 E.4\pi r^2$$

$$\therefore E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad «r > a» \quad \ldots\ldots (7 - 31)$$

لندرس الآن الوضع عندما تكون $r < a$ عند نقطة مثل A . بإمرار سطح كروي نصف قطره r' نلاحظ أن هذا السطح لا يحتوي داخله على أي شحنة .

بتطبيق نظرية جاوس ينتج :

$$0 = \oint_{\text{سطح الكرة}} \epsilon_0 E.\ ds$$

$$\therefore E = 0 \qquad «0 < r < a» \quad \ldots\ldots (7 - 32)$$

أي أن المجال الكهربي داخل الكرة يساوي الصفر . وهذه نتيجة عامة وهي أن المجال الكهربي داخل أي جسم موصل يساوي الصفر دائماً مهما كان شكل هذا الجسم سواء كان مصمتاً أو مفرغاً . وقد استفاد المهندسون من هذه النتيجة بعزل أي جهاز عن المجالات الكهربية الخارجية عن طريق إحاطته بقفص أو غلاف معدني .

لايجاد جهد نقطة P الخارجة عن الكرة نطبق المعادلة (19 - 7) .

$$V_p = \int_{r=\infty}^{r_p} - \bar{E}.\ d\bar{r}$$

$$= \int_{r=\infty}^{r_p} - \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 r^2} \, dr$$

$$V_p = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 r_p} \quad «r > a» \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (7 - 33)$$

ولحساب جهد نقطة A داخل الكرة .

$$V_A = \int_{r=\infty}^{r=rA} - \bar{E} . d\bar{r}$$

ولكن نظراً لأن E ينعدم عندما تصل r إلى a ويظل منعدماً حتى تصل r إلى r_A ، فيجب تقسيم التكامل كما يأتي :

$$V_A = \int_{r=\infty}^{r=a} \frac{-Q}{4\pi \epsilon_0 r^2} dr + \int_{r=a}^{r=rA} 0.dr$$

$$V_A = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 a} \quad «0 < r < a» \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (7 - 34)$$

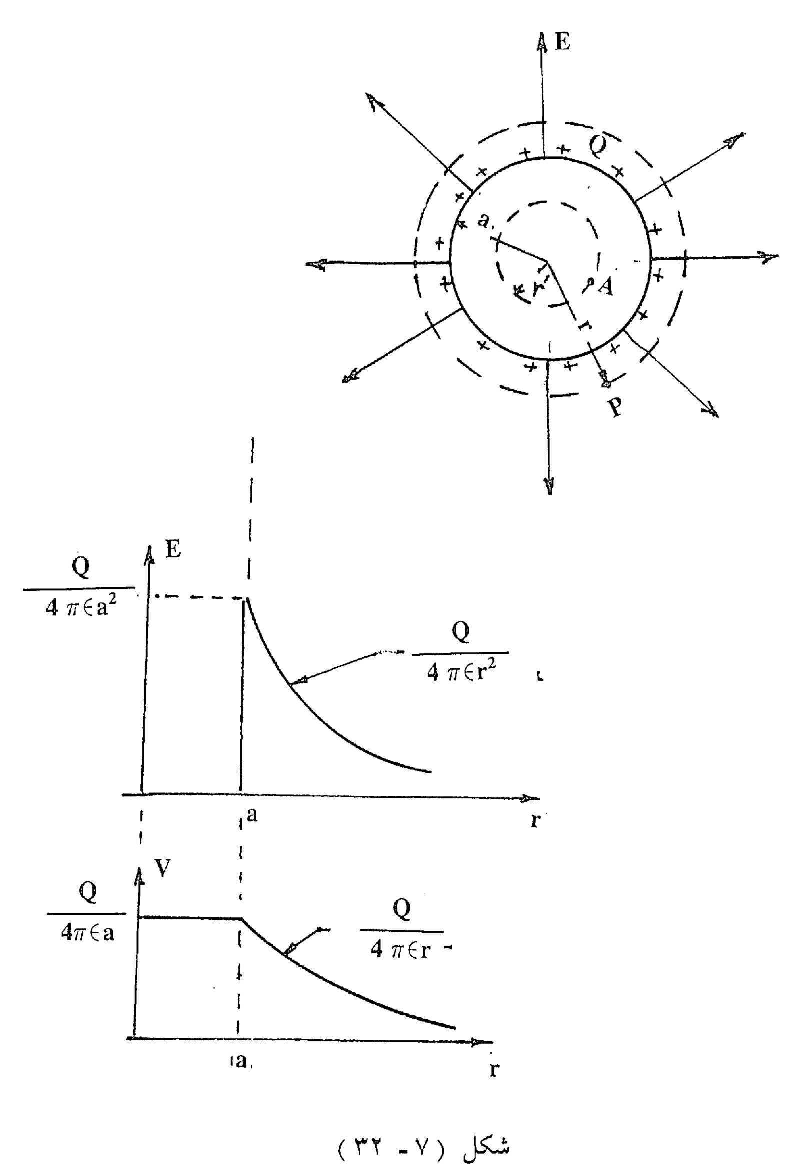
نلاحظ من المعادلة (34 - 7) أن الجهد داخل الكرة ثابت ويساوي الجهد على سطحها . وهذه نتيجة عامة وهي أن الجهد داخل أي جسم موصل مشحون ثابت دائماً ويساوي الجهد على سطح هذا الجسم .

يبين شكل (٧ ـ ٣٢) التوزيع البياني لكل من المجال والجهد .

٧ ـ ١٨ ـ ٢ سطح إسطواني لا نهائي :

نفرض الشحنة على سطح الأسطوانة هي λ كولوم لكل متر . نظراً للتماثل فإن المجال الكهربي يكون شعاعياً كما في شكل (٧ ـ ٣٣) . لايجاد شدة المجال عند نقطة مثل A على بعد r من المركز نمرر سطح جاوس بهذه

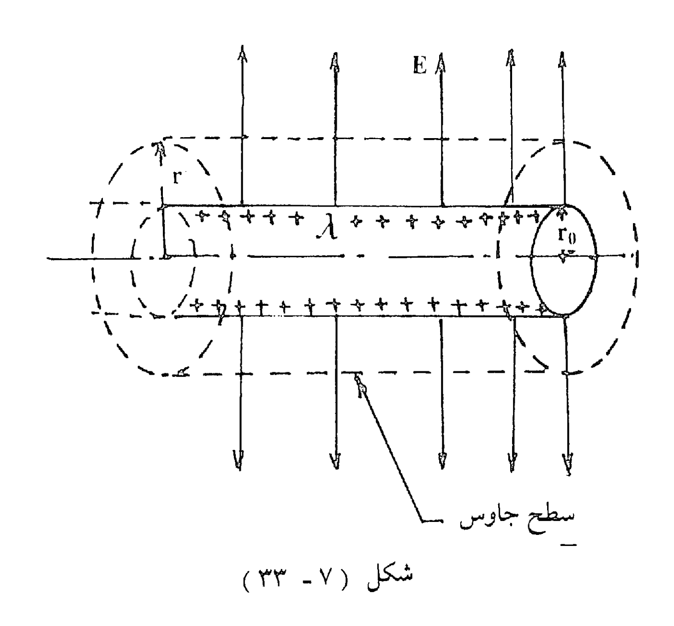
النقطة عبارة عن سطح أسطواني نصف قطره r . باعتبار طول مقداره ١ متر .



شكل (٧- ٣٢)

$$\lambda = \oint_{\text{سطح الأسطوانة}} \epsilon E ds$$

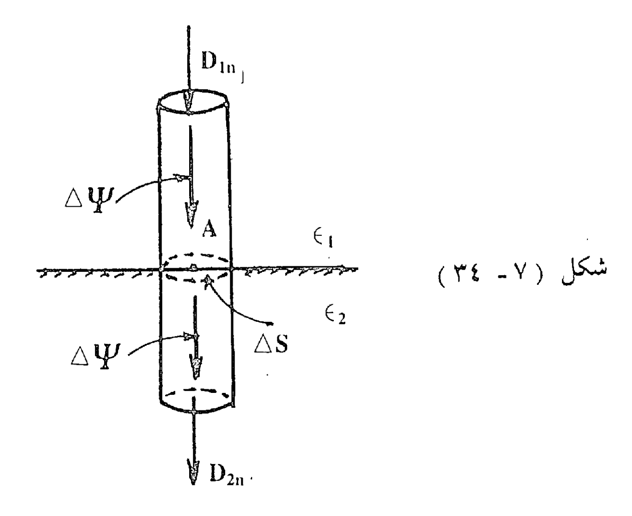
$$= \epsilon\, E.\, 2\pi\, r$$



شكل (٧ - ٣٣)

$$\therefore\ E = \frac{\lambda}{2\pi \epsilon r} \quad 0 < r < r_0 \qquad \text{(7 - 35)}$$

٧ - ١٩ الشروط الحدية Boundary Conditions :



شكل (٧ - ٣٤)

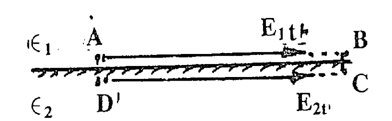
بالإشارة إلى شكل (٧ - ٣٤) ، لو تصورنا فيضاً $\Delta\Psi$ يمر في وسط عازل سماحيته ϵ_1 ثم انتقل إلى وسط عازل آخر سماحيته ϵ_2. في اتجاه عمودي على السطح الفاصل بين الوسطين عند نقطة A يحيط بها مساحة

Δs . نظراً لأن الفيض لا يمكن أن يتغير بين الوسطين فينتج عن ذلك أن كثافة الفيض في الإتجاه العمودي تظل ثابتة عند الإنتقال عبر السطح الفاصل ، أي أن :

$$D_{1n} = D_{2n} \qquad (7 - 36)$$

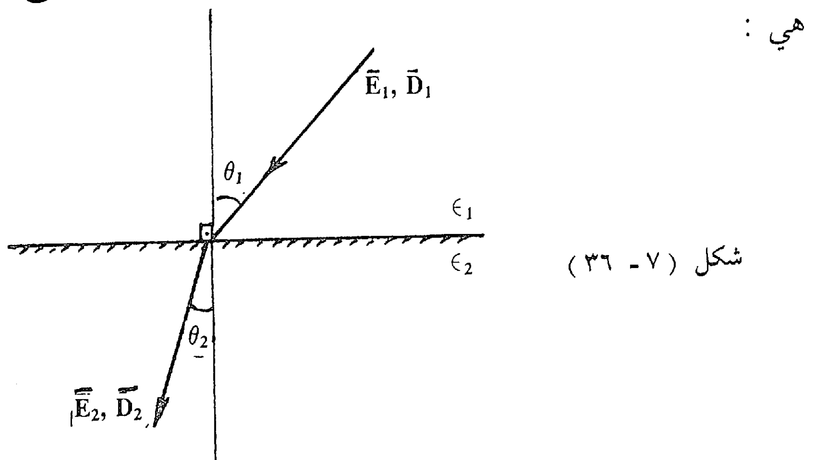
لو تصورنا الآن مجالين كهربيين مماسين للسطح الفاصل بين العازلين كما هو موضح بالشكل (٧ - ٣٥) . يشترط هنا أن يتساوى المجالين E_{1t} و E_{2t} حتى يكون الشغل المبذول في رسم المسار DCBA يساوي الصفر ، أي أن :

$$E_{1t} = E_{2t} \qquad (7 - 37)$$



شكل (٧ - ٣٥)

وفي الحالة العامة ، إذا اخترق مجال كهربي $\bar{E}_1$ و $\bar{D}_1$ وسطاً عازلاً سماحيته ϵ_1 ثم انتقل إلى وسط عازل آخر سماحيته ϵ_2 فأصبح $\bar{E}_2$ و $\bar{D}_2$ كما هو موضح بالشكل (٧ - ٣٦) ، فإن الشروط الحدية عند السطح الفاصل هي :



شكل (٧ - ٣٦)

$E_{1t} = E_{2t}$,

$D_{1n} = D_{2n}$

أي أن :

$$E_1 \sin \theta_1 = E_2 \sin \theta_2 \quad \text{.......} \quad (7 - 38)$$

$$D_1 \cos \theta_1 = E_2 \cos \theta_2 \quad \text{.......} \quad (7 - 39)$$

$$\therefore \epsilon_1 E_1 \cos \theta_1 = \epsilon_2 E_2 \cos \theta_2 \quad \text{.......} \quad (7 - 40)$$

وبقسمة (40 - 7) على (38 - 7) ينتج :

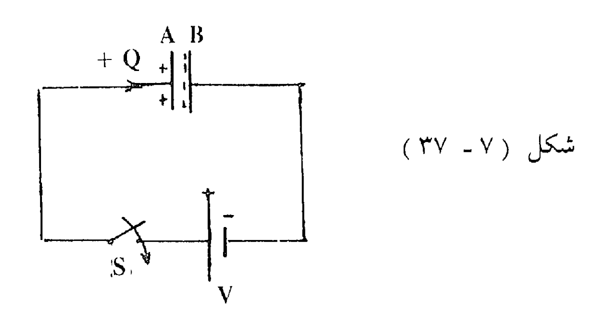
$$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} \quad \text{.......} \quad (7 - 41)$$

٧ ـ ٢٠ المكثفات Capacitors :

المكثف هو جهاز يستعمل لتخزين الطاقة الكهربية . وهو يتكون أساساً من سطحين موصلين يفصل بينهما مادة عازلة . وسعة المكثف Capacitance تعطي مقياساً لقدرة المكثف على اختزان الطاقة عند فرق جهد معين بين سطحيه . وهي تعطي أيضاً مقياساً لقدرة المكثف على اختزان الشحنة عند فرق جهد معين . بالإشارة إلى شكل (٧ ـ ٣٧) الذي يبين مكثفاً ذا لوحين متوازيين يتصل ببطارية جهدها V . بمجرد قفل المفتاح S تبدأ الشحنات الموجبة في التحرك من البطارية حتى تصل إلى اللوح A وتستقر عليه فيتكون بالتأثير شحنات سالبة مساوية لها على اللوح B . ويرتفع بذلك فرق الجهد بين اللوحين . وباستمرار تراكم الشحنات على A يستمر ارتفاع فرق الجهد حتى تصل قيمته إلى جهد البطارية فيتوقف بذلك سريان الشحنات ويتم شحن المكثف . تبعاً لتعريف سعة المكثف فإنها تساوي الشحنة اللازمة لرفع فرق الجهد بين سطحي المكثف بمقدار فولت واحد ، أي أن :

$$Q = CV \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7 - 42)$$

ووحدة السعة هي الفاراد وهي تكافىء كولوم / فولت . وهي وحدة كبيرة جداً من الناحية العملية حيث يستعمل عادة الميكروفاراد $(1\,\mu F = 10^{-6}F)$ في تحديد قيمة السعة .



شكل (٧ - ٣٧)

٧ - ٢١ سعة كرة معزولة :

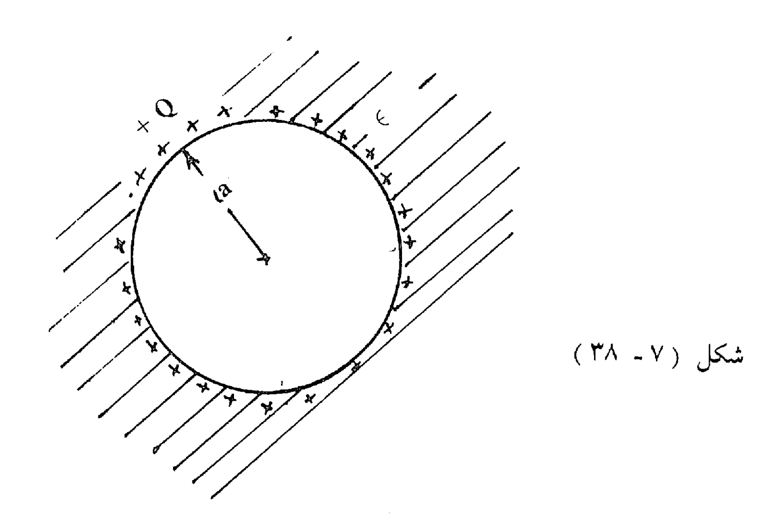
لإيجاد سعة سطح كروي معزول نفرض شحنة Q على السطح ثم نوجد جهد هذا السطح . بالإشارة إلى شكل (٧ - ٣٨) ، الجهد على سطح الكرة هو :

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon}$$

وعلى ذلك :

$$C = \frac{Q}{V} = 4\pi\epsilon a \qquad F. \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7-43)$$

حيث ϵ هي سماحية الوسط المحيط بالكرة . وتجدر الإشارة هنا إلى أن السعة المستنتجة بالمعادلة (43 - 7) هي السعة بين سطح الكرة وسطح الأرض . وسبب ذلك أن الجهد المستخدم هو الجهد المطلق لسطح الكرة .



شكل (٧ - ٣٨)

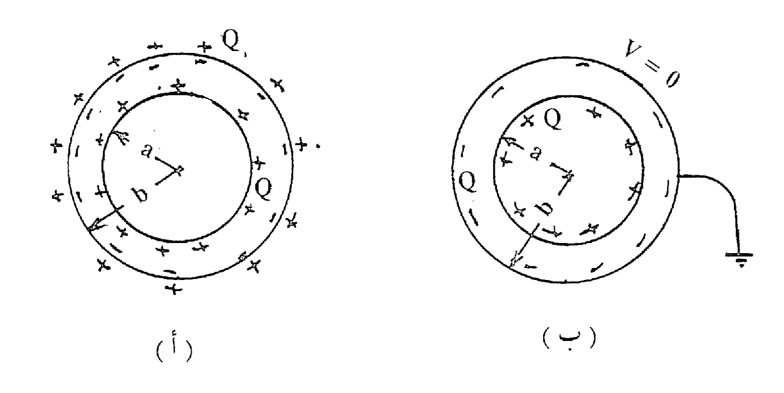
٧ - ٢٢ سعة مكثف كروي مؤرض سطحه الخارجي :

في أغلب حالات استعمال المكثفات يوصل أحد سطحيه بالأرض وذلك لرفع سعة المكثف ولدواعي الأمان . نفرض مكثفاً يتكون من سطحين كرويين كما في شكل (٧ - ٣٩ - أ) ، ونفرض أن الكرة الداخلية قد تم شحنها بشحنة Q + . سوف تتكون شحنة سالبة بالحث على السطح الداخلي للكرة الخارجية تاركة شحنة موجبة على السطح الخارجي لهذه الكرة . عند توصيل الكرة الخارجية بالأرض تتسرب الشحنة الموجبة التي عليها إلى الأرض بينما تبقى الشحنة السالبة التي على سطحها الداخلي ويصبح جهد الكرة الخارجية مساوياً للصفر ، كما في الشكل (٧ - ٣٩ - ب) . سوف نستعمل المعادلة (31 - 7) لايجاد فرق الجهد بين سطحي المكثف ،

$$V = \int_{r=b}^{r=a} -\frac{Q}{4\pi \in r^2} \, dr$$

$$= \frac{Q}{4\pi \in} \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right]$$

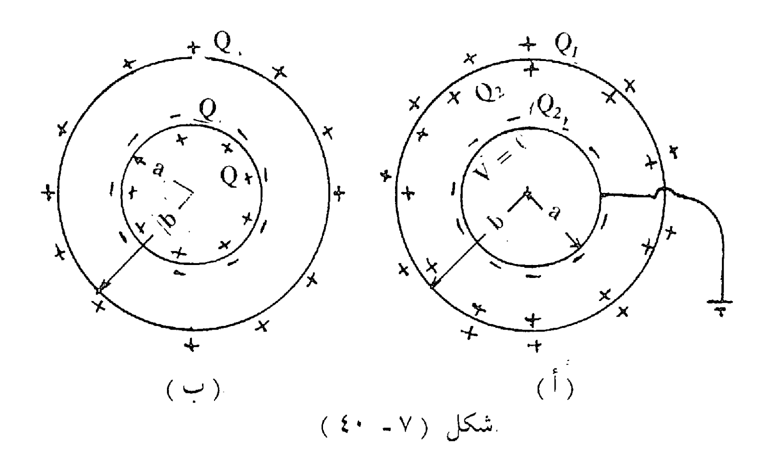
$$C = \frac{Q}{V} = 4\pi \in \frac{ba}{b-a} \quad F. \qquad (7 - 44)$$



شكل (٧ - ٣٩)

سعة مكثف كروي مؤرض سطحه الداخلي :

نفترض الآن أن المكثف الكروي قد أعطى شحنة Q + على سطحه الخارجي . فيتكون بذلك الشحنتان Q − و Q + على سطحي الكرة الداخلية كما هو موضح بالشكل (٧ - ٤٠ - أ) . عند توصيل الكرة الداخلية بالأرض سيصبح جهدها مساوياً للصفر . وهذا سوف يؤثر مباشرة على توزيع الشحنات على سطحي الكرتين . سوف تجد الكرة الخارجية نفسها محاطة بالأرض من خارجها وأيضاً محيطة بالأرض - سطح جهده الصفر - من داخلها . ولهذا تنقسم الشحنة Q + التي عليها إلى جزئين Q_1 + نحو الأرض و Q_2 + نحو الكرة الداخلية المؤرضة . وتبعاً لذلك سوف يتسرب جزء آخر من الشحنة Q − الموجودة على الكرة الداخلية حتى تصير الشحنة عليها هي Q_2 − ، وذلك لكي تتساوى مع الشحنة المقيدة لها Q_2 + على السطح الداخلي للكرة الخارجية . الشكل (٧ - ٤٠ - ب) يوضح الوضع النهائي لتوزيع الشحنات . نفرض أن جهد الكرة الخارجية هو V . يمكن إيجاد V من ناحيتين ؛ باعتبار الشحنة Q_1 + على سطح الكرة الخارجية ، وباعتبار V يساوي فرق الجهد بين الكرتين نتيجة للشحنتين Q_2 + و Q_2 − .



شكل (٧ - ٤٠)

وعلى ذلك :

$$V = \frac{Q_1}{4\pi \epsilon b}$$

$$V = \frac{Q_2 (b - a)}{4\pi \epsilon ba}$$

وبما أن $C = \frac{Q}{V}$ و $Q = Q_1 + Q_2$ فينتج :

$$C = \frac{Q_1 + Q_2}{V} = \frac{(4\pi \epsilon b) V + (4\pi \epsilon\, ba/b - a)V}{V}$$

$$= 4\pi \epsilon b + 4\pi\epsilon \frac{ba}{b - a} \quad F. \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7 - 45)$$

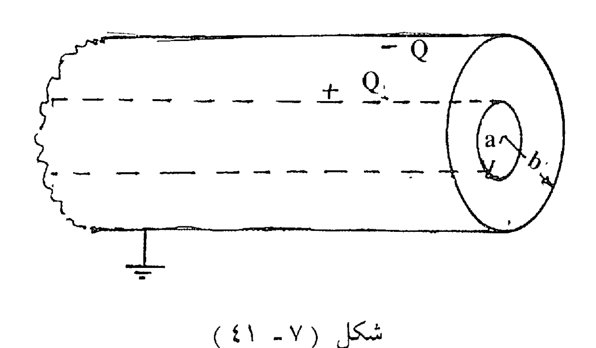
٧ - ٢٣ سعة كابل مؤرض سطحه الخارجي :

يمكن اعتبار الكابل سطحاً إسطوانياً موصلاً محاطاً بسطح إسطواني آخر موصل ومؤرض . توجد عادة طبقة عازلة - أو أكثر - بين السطحين . نفرض شحنة Q + على سطح الموصل الداخلي ثم نحسب فرق الجهد بين السطحين وذلك بالاستعانة بالمعادلة (35 - 7) .

$$V = \int_{r=b}^{r=a} - \frac{Q}{2\pi \epsilon r} \, dr$$

$$= \frac{Q}{2\pi\epsilon} \log_e \frac{b}{a}$$

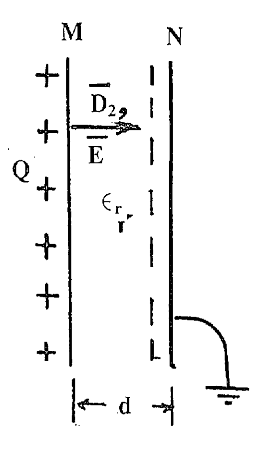
$$C = \frac{Q}{V} = 2\pi\epsilon / (\log_e \frac{b}{a}) \text{ F.} \quad \text{............................} \quad (7 - 46)$$



شكل (٧ـ ٤١)

٧ ـ ٢٤ سعة مكثف متوازي اللوحين :

يتكون المكثف من لوحين مستويين متوازيين M و N مساحة كل منهما A متر[٢] يفصل بينهما مادة عازلة سمكها d متر وسماحيتها النسبية ϵ_r كما هو موضح بالشكل (٧ـ ٤٢) .



شكل (٧ـ ٤٢)

نفرض أن الشحنة الكلية على أحد اللوحين هي Q ، فيكون الفيض

الكلي مساوياً للشحنة Q . كثافة الفيض D تعطي بالعلاقة .

$$D = \frac{\Psi}{A} = \frac{Q}{A}$$

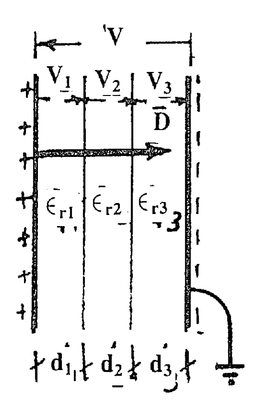
$$E = \frac{V}{d} = \frac{D}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

$$\therefore \frac{Q}{A} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d} V$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad F \qquad \text{..........} \quad (7 - 47)$$

سعة مكثف به أكثر من عازل :

بالإشارة إلى شكل (٧ - ٤٣) .



شكل (٧ - ٤٣)

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$= E_1 d_1 + E_2 d_2 + E_3 d_3$$

$$= \frac{D}{\epsilon_0 \epsilon_{r1}} d_1 + \frac{D}{\epsilon_0 \epsilon_{r2}} d_2 + \frac{D}{\epsilon_0 \epsilon_{r3}} d_3$$

$$= \frac{D}{\epsilon_0} \left[\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} + \frac{d_3}{\epsilon_{r3}} \right]$$

$$= \frac{Q}{A\ \epsilon_0} \left[\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} + \frac{d_3}{\epsilon_{r3}} \right]$$

$$C = \frac{Q}{V}$$

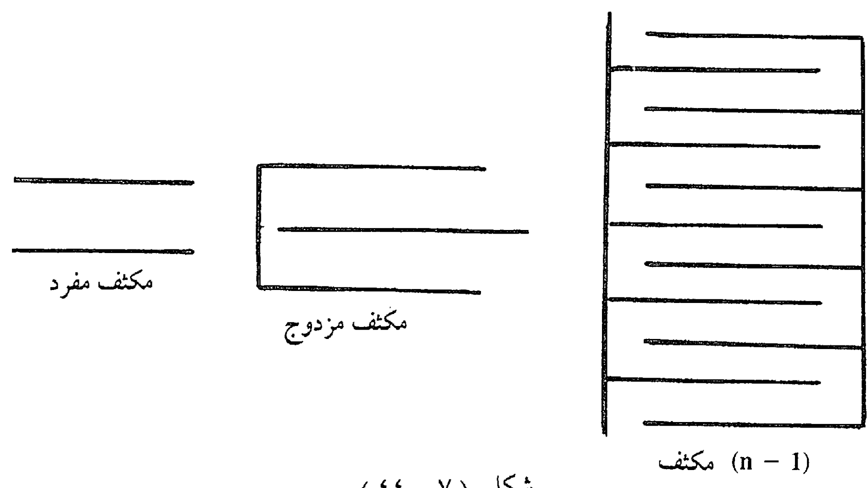
$$C = \frac{\epsilon_0 A}{\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} + \frac{d_3}{\epsilon_{r3}}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7 - 48)$$

ولأي عدد n من طبقات العازل يصبح :

$$C = \frac{\epsilon_0\ A}{\Sigma_{i=1}^{n}\ (di/\epsilon_{ri})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7 - 49)$$

٧ ـ ٢٥ صناعة المكثفات :

تصنع المكثفات عادة على احدى الصور الموضحة بالشكل (٧ ـ ٤٤) . وبصفة عامة ، فإن سعة المكثف الذي يحتوي على n من الألواح [$(n - 1)$ من المكثفات] هي .



شكل (٧ ـ ٤٤)

$$C = (n - 1) \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad F. \quad \dots\dots \quad (7 - 50)$$

أكثر أنواع المكثفات إستعمالاً هي ما يأتي :

(أ) مكثفات المايكا : وهي تتكون من لوحين معدنيين بينهما طبقة من المايكا كعازل . وتتميز بصغر معامل القدرة على التيار المتردد وتستعمل على ترددات الراديو .

(ب) مكثفات السيراميك : وتتكون من قرص من السيراميك مطلي وجهيه بطبقة من الفضة . وهي مناسبة لموجات الراديو القصيرة بسبب نقص معامل القدرة عند الترددات العالية .

(جـ) المكثفات الورقية : وهي عبارة عن طبقات من لفائف الألومنيوم يفصل بينها ورق مشبع بشمع البارافين . وهي مناسبة عند الترددات السمعية وكمكثفات إزدواجية Coupling Capacitors .

(د) المكثفات الالكتروليتية : وتتكون من قطبين من الألومنيوم (موجب وسالب) يفصل بينهما مادة الكتروليتية (بورات الأمونيوم) . وتتميز هذه المكثفات بكبر سعتها وتستعمل عادة كدوائر تنعيم في أعمال الراديو .

٧ ـ ٢٦ أمثلة :

مثال ٧ : ٧

مكثف مكون من سطحين كرويين ومؤرضة كرته الخارجية . إذا كانت سعة هذا المكثف هي (53.33 pf) فعين نصفي قطري الكرتين إذا كان الفرق بينهما هو (4 Cm) .

سعة المكثف الكروي المؤرضة كرته الخارجية تعطي بالمعادلة (7 - 44) :

$$C = 4\pi \epsilon_0 \frac{ba}{b-a}$$

حيث a و b هما نصفا قطري الكرتين :

$$53.33 \times 10^{-12} = \frac{a\,(a + 0.04)}{0.04}$$

ومنها ينتج :

$a = 12$ Cm.
$b = 16$ Cm.

مثال ٧ : ٨

يتكون مكثف من لوحين معدنيين متوازيين مساحة كل منهما ($2\ m^2$) يفصل بينها ثلاث طبقات من عوازل مختلفة ذات سماحية نسبية (2, 3, 6) وسمك (0.4, 0.6, 1.2 mm.) على الترتيب . عين السعة الكلية للمكثف وشدة المجال في كل طبقة إذا كان فرق الجهد بين اللوحين (100V) .

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} + \frac{d_3}{\epsilon_{r3}}} \quad \text{Farad}$$

$$= \frac{8.854 \times 10^{-2} \times 2}{\frac{0.4 \times 10^{-3}}{2} + \frac{0.6 \times 10^{-3}}{3} + \frac{1.2 \times 10^{-3}}{6}}$$

$$= 0.0295 \times 10^{-6}\ F$$

$$Q = CV = 0.0295 \times 10^{-6} \times 1000 = 29.5 \times 10^{-6} C.$$

$$D = \frac{Q}{A} = \frac{29.5 \times 10^{-6}}{2} = 14.75 \times 10^{-6}\ C/m^2$$

$$E_1 = \frac{D}{\epsilon_0\, \epsilon_{r1}} = 833.3\ KV / m.$$

$$E_2 = \frac{D}{\epsilon_0 \epsilon_{r2}} = 555.4 \ KV/m.$$

$$E_3 = \frac{D}{\epsilon_0 \epsilon_{r3}} = 277.7 \ KV/m.$$

مثال ٧ : ٩

مكثف ذو ألواح متوازية يتكون من 15 لوحاً مساحة كل منها $(0.25 \ m^2)$ ويفصل بين كل لوحين عازل سمكه 0.2 Cm. وسماحيته النسبية 3 . احسب سعة هذا المكثف .

باستعمال المعادلة (50 - 7) :

$$C = \frac{(n-1) \ \epsilon_0 \epsilon_r . A}{d} \quad F.$$

$$= \frac{14 \times 8.853 \times 10^{+12} \times 3 \times 0.25}{2 \times 10^{-3}}$$

$$= 46.48 \times 10^{-9} \ F.$$

٧ ـ ٢٧ الطاقة المختزنة في المكثف :

ذكرنا في البند ٧ ـ ٢٠ أن المكثف يختزن طاقة كهروستاتيكية في مجاله الكهربي الناشىء بين لوحيه . وهذه الطاقة يكتسبها المكثف أثناء عملية الشحن . نفرض أن فرق الجهد بين اللوحين هو v . الشغل المبذول لإضافة شحنة dq على لوحي المكثف هو dw حيث :

$$dw = v.dq$$

$$q = Cv$$

$$dq = C.dv$$

$$\therefore \; dw = Cvdv$$

حيث dw يعطي الشغل الخارجي المبذول لرفع فرق جهد المكثف من v إلى (v + dv) . ولرفع فرق الجهد من الصفر إلى V .

$$\int dw = \int_0^V Cvdv$$

$$w = \frac{1}{2}CV^2 \quad \text{Joules} \quad \dots\dots \quad (7 - 51)$$

حيث w هي الطاقة المختزنة داخل المكثف . من المعادلة (51 - 7) .

$$w = \frac{1}{2}C\left(\frac{Q}{C}\right)^2$$

$$w = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} \quad J. \quad \dots\dots \quad (7 - 52)$$

وفي حالة مكثف اللوحين المتوازيين :

$$w = \frac{1}{2}\frac{\epsilon A}{d}(E.d)^2$$

$$w = \frac{1}{2}\epsilon E^2 . Ad \quad J. \quad \dots\dots \quad (7 - 53)$$

وعلى ذلك فإن الطاقة المختزنة في وحدة الحجوم هي :

$$\frac{w}{Ad} = \frac{1}{2}\epsilon E^2 = \frac{1}{2}DE \quad J/m^3 \quad \dots\dots \quad (7 - 54)$$

٧ ـ ٢٨ قوة التجاذب بين لوحي مكثف متوازي اللوحين :

لو تصورنا مكثفاً متوازي اللوحين مساحة لوحه A والمسافة بين اللوحين d . الطاقة المختزنة في المكثف هي :

$$w = \frac{1}{2} \epsilon E^2 . Ad$$

نفرض الآن أننا نود زيادة المسافة d بمقدار dx (تؤول في النهاية إلى الصفر) . الشغل المبذول في هذه الزيادة يساوي القوة بين اللوحين F مضروبة في المسافة dx .

$$dw = F.dx$$

حيث :

$$dw = \frac{1}{2} \epsilon E^2 Adx$$

$$\therefore F\,dx = \frac{1}{2} \epsilon E^2 Adx$$

$$F = \frac{1}{2} \epsilon E^2 A \quad N. \quad \dots\dots \quad (7 - 55)$$

والقوة على وحدة المساحات هي :

$$\frac{F}{A} = \frac{1}{2} \epsilon E^2 \quad N / m^2 \quad \dots\dots \quad (7 - 56)$$

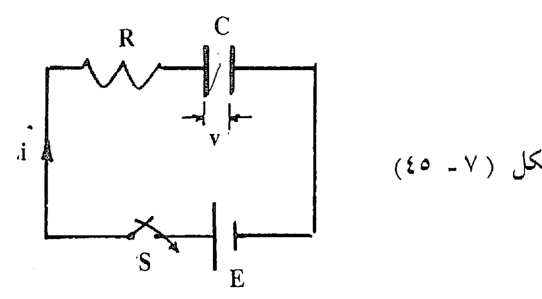
٧ ـ ٢٩ شحن المكثف :

يشحن المكثف عادة بواسطة دائرة كالمبينة بالشكل (٧ ـ ٤٥) . نفرض أنه كانت شحنة q_0 على لوحي المكثف عند لحظة قفل المفتاح s ؛ أي أن :

$$At \;\; t = 0 \qquad q_0 = Cv_0$$

عند أية لحظة تالية t ، الشحنة q هي :

$$q = Cv$$



شكل (٧- ٤٥)

حيث v هو فرق الجهد عند هذه اللحظة . التيار المار في الدائرة عند اللحظة t هو i حيث :

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(Cv) = C\frac{dv}{dt}$$

ومن معادلة الدائرة ؛

$$E = iR + v$$

$$E = RC\frac{dv}{dt} + v$$

$$\therefore \int_{v0}^{v}\frac{dv}{E - v} = \int_{0}^{t}\frac{1}{RC}\,dt$$

$$-\left[\,l\,n\,(E - v)\,\right]_{v0}^{v} = \frac{1}{RC}\,t$$

$$\frac{E - v}{E - v_0} = e^{-(t/RC)}$$

$$v = E\,(1 - e^{-t/RC}) + v_0\,e^{-t/RC} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7 - 57)$$

نفرض الآن أن المكثف كان غير مشحون لحظة قفل المفتاح :

$$v_0 = 0$$

$$v = E\,(1 - e^{-t/RC}) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7 - 58)$$

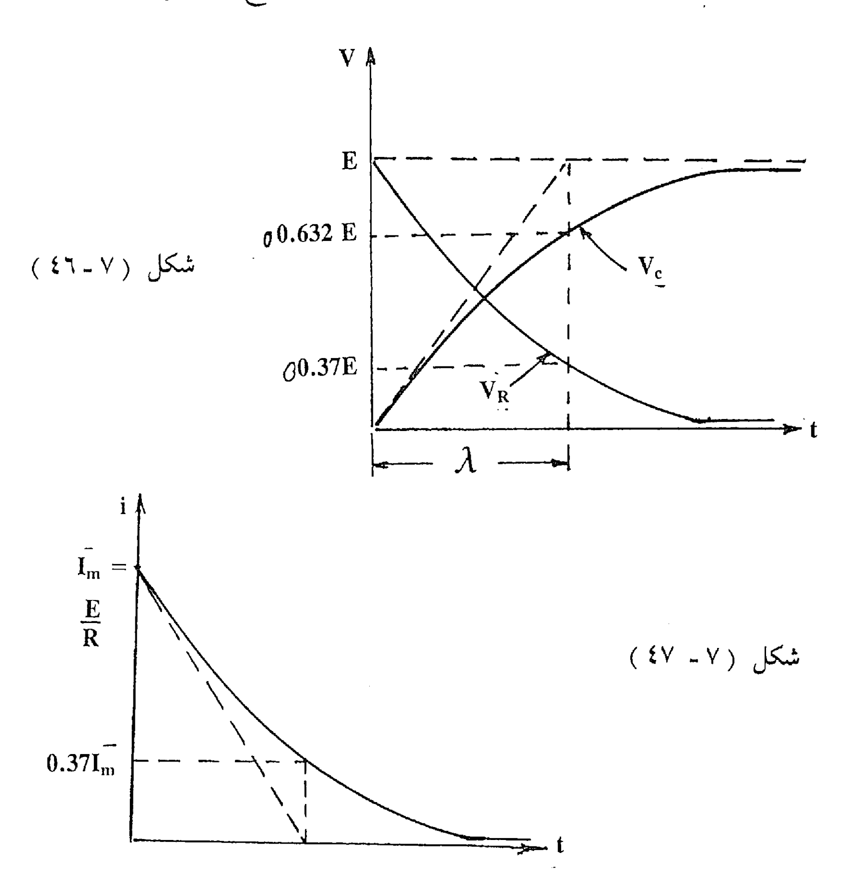
$$i = \frac{E - v}{R}$$

$$= \frac{1}{R} [E - E (1 - e^{-t/RC})]$$

$$i = \frac{E}{R} e^{-t/RC} \quad \text{...} \quad (7 - 59)$$

الكمية $\frac{E}{R}$ تعطي التيار المار في الدائرة عند لحظة قفل المفتاح «$t = 0$» .

يبين الشكل (٧ ـ ٤٦) تغير الجهد على كل من المقاومة والمكثف مع الزمن ، ويبين الشكل (٧ ـ ٤٧) تغير التيار مع الزمن .



شكل (٧ ـ ٤٦)

شكل (٧ ـ ٤٧)

الكمية (RC) تسمى الثابت الزمني للدائرة Time Constant . وهي تعطي قيمة الزمن الذي يصل عنده التيار إلى نسبة ($\frac{1}{e}$) من قيمته الإبتدائية .

$$\text{At} \quad t = RC = \lambda \qquad (7 - 60)$$

$$i = I_m \ e^{-1}$$

$$= 0.37 \quad I_m,$$

$$I_m = \frac{E}{R}$$

وعند هذه اللحظة ، فإن قيمة الجهد على المكثف تصبح :

$$v_Y = E\,(1 - e^{-1})$$

$$= 0.632\ E$$

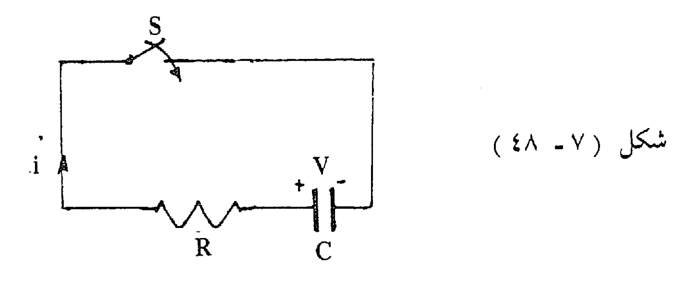
أي أنه عند الثابت الزمني λ :

١ ـ تهبط قيمة التيار إلى 36.8% من قيمته الإبتدائية العظمى .

٢ ـ تزيد قيمة الجهد على المكثف إلى 63.2% من قيمته النهائية العظمى .

٧ ـ ٣٠ تفريغ المكثف :

نفرض للدائرة الموضحة بالشكل (٧ ـ ٤٨) أن جهد المكثف كان V لحظة قفل المفتاح S .



شكل (٧ ـ ٤٨)

بعد أي زمن t ، جهد المكثف هو v والشحنة عليه q والتيار المار في الدائرة i .

$$i = \frac{dq}{dt} = C\frac{dv}{dt}$$

$$iR + v = 0$$

$$RC\frac{dv}{dt} + v = 0$$

$$\int_V^v \frac{dv}{v} = -\int_0^t \frac{1}{RC}\, dt$$

$$l\,n\,\frac{v}{V} = -\frac{t}{RC}$$

$$v = Ve^{-t/RC}$$

$$v = Ve^{-t/\lambda}$$

$$i = C\frac{dv}{dt} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7 - 61)$$

$$= \frac{V}{R}\, e^{-t/\lambda}$$

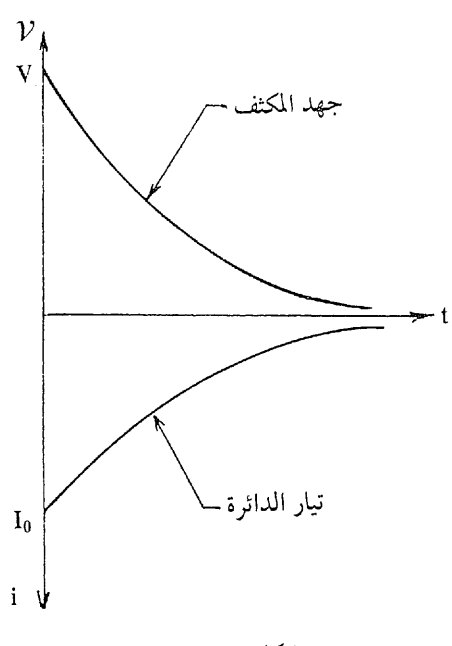
$$i = I_0\, e^{-t/\lambda} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7 - 62)$$

يبين الشكل (٧ ـ ٤٩) تغير جهد المكثف وتيار الدائرة مع الزمن :

٧ ـ ٣١ توصيل المكثفات :

توصل المكثفات عادة إما على التوالي وإما على التوازي كما هو موضح بالشكل (٧ ـ ٥٠) . عند التوصيل على التوالي تتساوى الشحنات على جميع

المكثفات ، وعند التوصيل على التوازي يتساوى فرق الجهد على جميع المكثفات .



شكل (٧- ٤٩)

(أ) التوصيل على التوالي :

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$$

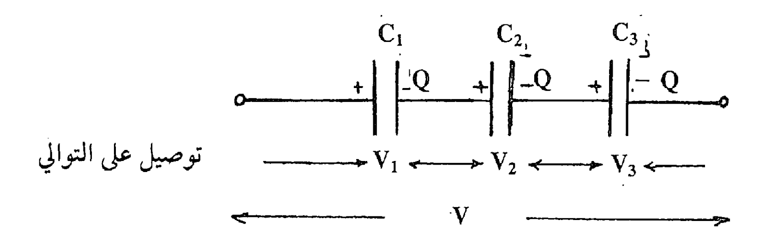
$$C_1V_1 = C_2\,V_2 = C_3V_3 = CV$$

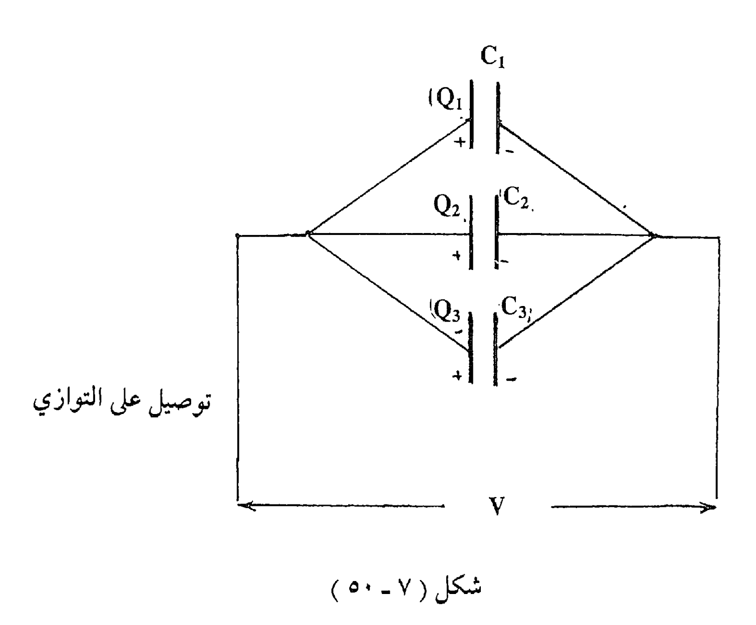
حيث C هي السعة المكافئة للمكثفات الثلاثة :

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$\therefore \frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$





شكل (٧ ـ ٥٠)

وبصفة عامة ، لعدد n من المكثفات الموصلة على التوالي :

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i} \quad \text{...} \quad (7 - 63)$$

(ب) التوصيل على التوازي :

$$V_1 = V_2 = V_3 = V$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

حيث Q هي الشحنة الكلية على المكثف المكافىء .

$$CV = C_1 V_1 + C_2 V_2 + C_3 V_3$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

وبصفة عامة ، لعدد n من المكثفات الموصلة على التوازي :

$$C = \Sigma_{i=1}^{N} C_i \quad \text{......} \quad (7-64)$$



الباب الثامن

المغناطيسية والكهرومغناطيسية

MAGNETISM AND ELECTROMAGNETISM

٨ - ١ المفاهيم الأساسية للمغناطيسية :

يتميز المغناطيس بوجود قطبين مختلفين على طرفيه ؛ قطب شمالي (N) وقطب جنوبي «S» . عند تقريب قطبين متشابهين من بعضهما يحدث بينهما قوة تنافر ، وإذا كان القطبان مختلفين تحدث بينهما قوة تجاذب . يتناسب مقدار القوة بين القطبين مع ما يأتي :

(أ) شدة كل من القطبين m_1 و m_2 .

(ب) عكسياً مع مربع المسافة بينهما r .

(جـ) الوسط الموجود فيه القطبان .

وقد تم تجريبياً إثبات قانون القوة بين قطبين مغناطيسيين وهو ما يُعرف أحياناً بقانون كولوم للمغناطيسية على النحو التالي :

$$F = \frac{m_1 m_2}{4 \pi \mu r^2} \qquad (8 - 1)$$

حيث μ ثابت يعتمد على الوسط ويسمى النفاذية Permeability .

والنفاذية للفراغ - أو الهواء - هي μ_0 حيث :

$$\mu_0 = 4\,\pi \times 10^{-7} \text{ Henry / meter (H/m)} \quad \ldots\ldots \quad (8 - 2)$$

وأي وسط آخر تُعطي نفاذيته μ عادة على الصورة :

$$\mu = \mu_r\, \mu_0 \quad \ldots\ldots \quad (8 - 3)$$

حيث μ_r هي النفاذية النسبية لهذا الوسط .

وحدة شدة الأقطاب هي الويبر Weber وهي شدة القطب التي إذا وُضعت على بعد متر واحد من قطب مساوٍ لها تنشأ بينهما قوة مقدارها $\dfrac{1}{4\,\pi\,\mu_0}$ نيوتون .

المجال المغناطيسي هو المنطقة الذي يظهر فيها أثر القطب المغناطيسي على صورة قوة جذب أو نفر على قطب آخر .

٨ - ٢ الفروض الأساسية :

يمكن بطريقة مشابهة لتلك التي اتُّبعت في المجال الكهربي وضع عدد من الفروض الأساسية بغرض تفسير وتحليل المجال المغناطيسي . وهذه الفروض هي كما يأتي :

٨ - ٢ - ١ خطوط القوى Lines of Force :

يُخطط المجال المغناطيسي عن طريق رسم خطوط قوى فيه بحيث أن :

(أ) المماس لخط القوة عند أي نقطة يعطي اتجاه القوة على قطب شمالي موجود في هذه النقطة .

(ب) عدد خطوط القوى التي تخترق مساحة صغيرة عمودية على تلك

الخطوط تحدد شدة المجال المغناطيسي عند هذه النقطة .

(جـ) تنبع خطوط القوى دائماً من القطب الشمالي وتدخل إلى القطب الجنوبي .

٨ - ٢ - ٢ الفيض المغناطيسي Magnetic Flux :

وحدة الأقطاب الشمالية ينبع منها فيض مقداره ويبر واحد . وعلى ذلك فإن قطباً شمالياً شدته m ينبع منه فيض $\varnothing$ مقداره :

$$\varnothing = m \quad wb. \qquad (8 - 3)$$

٨ - ٢ - ٣ كثافة الفيض Flux Density (B) :

هي مقدار الفيض لوحدة المساحات الذي يخترق المساحة عمودياً عليها ، أي أن :

$$B = \frac{\varnothing}{S} wb / m^2 \qquad (8 - 4)$$

وبصورة عامة ، إذا كان توزيع الفيض غير منتظم على المساحة فإن :

$$\varnothing = \int_s \int \bar{B}.\bar{ds} \qquad (8 - 5)$$

$$= \int_s \int B_n \, ds \qquad (8 - 6)$$

٨ - ٣ شدة المجال Field Intensity (H) :

شدة المجال المغناطيسي عند نقطة ما هي مقدار القوة المؤثرة على وحدة الأقطاب الشمالية الموضوعة عند هذه النقطة . لقطب شدته m ويبر ، شدة المجال على بعد r متر منه هي :

$$H = \frac{m}{4 \pi \mu_0 r^2} \quad N / wb \qquad (8 - 7)$$

ووحدة شدة المجال هي نيوتون / ويبر ، ولها وحدة أخرى هي الأمبير . لفَّة / متر والتي سوف نتحدث عنها فيما بعد في الكهرومغناطيسية . وشدة المجال هي كمية متجهة بطبيعة الحال .

نعتبر الآن سطحاً كروياً نصف قطره r يحيط بقطب مغناطيسي شدته m في مركز السطح . ينبع من هذا القطب فيض مقداره m . ومن التماثل نجد أن كثافة الفيض B على السطح الكروي هي :

$$B = \frac{\varnothing}{4 \pi r^2} = \frac{m}{4 \pi r^2} \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (8 - 8)$$

وبمقارنة المعادلتين (7 - 8) و(8 - 8) نجد أن :

$$B = \mu_0 H \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (8 - 9)$$

ولأي وسط آخر غير الهواء :

$$B = \mu H \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (8 - 10)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (8 - 11)$$

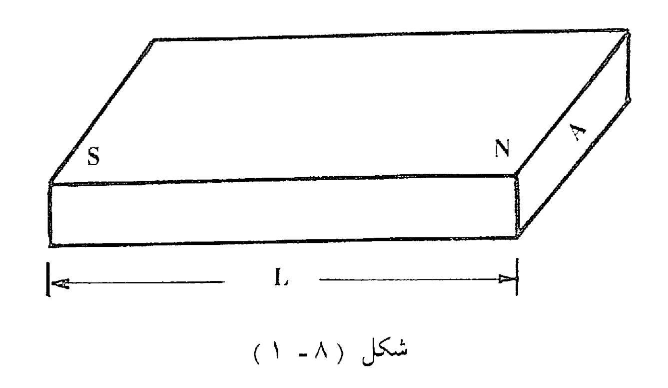
٨ ـ ٤ شدة المغناطيسية (I) Intensity of Magnetism :

شدة المغناطيسية للمغناطيس هي شدة القطب لوحدة المساحات . بالإشارة إلى شكل (٨ ـ ١) ،

$$I = \frac{m}{A} \quad wb / m^2. \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (8 - 12)$$

$$= \frac{m.}{A.} \frac{L}{L}$$

$$\therefore I = \frac{M}{V} \quad wb / m^2 \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (8 - 13)$$



شكل (٨ - ١)

الكمية ($m. 2l$) هي عزم المغناطيس و (V) هي حجمه . وعلى هذا فشدة المغناطيسية لأي مغناطيس تساوي عزمه المغناطيسي لوحدة الحجوم .

٨ - ٥ العلاقة بين النفاذية المطلقة (μ) والنفاذية النسبية μ_r :

نفرض مجالاً شدته H . هذا المجال يولد كثافة فيض في الهواء يعطي بالعلاقة :

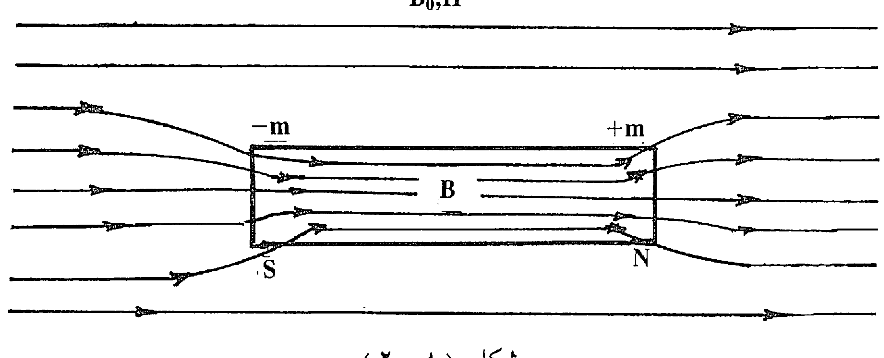
$$B_0 = \mu_0 H \qquad (8 - 14)$$

نفرض الآن أن قضيباً من الحديد مساحة مقطعه A قد وضع في هذا المجال . نلاحظ أن كثافة الفيض داخل هذا القضيب تزيد إلى القيمة B حيث $B = \mu H$. كما نلاحظ أن المغناطيس يكتسب مغناطيسية بالتأثير بحيث يتكون له قطبان (شمالي وجنوبي) كما هو موضح بالشكل (٨ - ٢) . نفرض أن شدة كل قطب هي m . الفيض المغناطيسي داخل قضيب الحديد هو نتيجة لمجالين ؛ المجال الأصلي B_0 والمجال الناشيء من القطبين B_i ، أي أن :

$$B = B_0 + B_i \qquad (8 - 15)$$

حيث :

$$B_i = \frac{\varnothing_i}{A} = \frac{m}{A}$$



شكل (٨ - ٢)

$$\therefore\ B = B_0 + I$$

$$\mu H = \mu_0 H + I$$

$$\mu_0\ \mu_r\ H = \mu_0 H + I$$

$$\mu_r = 1 + \frac{I}{H\ \mu_0}$$

$$\mu_r = 1 + \frac{K}{\mu_0} \quad \text{.......................................} \quad (8 - 16)$$

حيث K هي سماح مادة المغناطيس ، وهي التي تحدد نوع المادة من حيث قابليتها للمغناطيسية وذلك على النحو التالي :

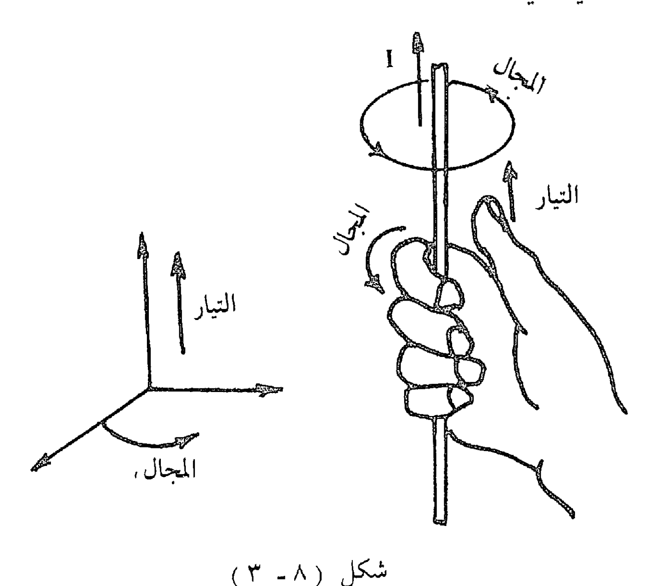
(أ) للمواد المغناطيسية (الحديدية) Ferro - magnetic تكون K موجبة و μ_r أكبر من الواحد بكثير كما في الحديد والنيكل والكوبالت .

(ب) للمواد أشباه المغناطيسية Para - magnetic تكون K موجبة و μ_r أكبر من الواحد قليلاً كما في الألومنيوم .

(جـ) للمواد أضداد المغناطيسية Diamagnetic تكون K سالبة و μ_r أقل من الواحد كما في البيزموث .

٨ ـ ٦ أساسيات الكهرومغناطيسة :

اكتشف أورستيد أن السلك الحامل للتيار ينشىء مجالاً مغناطيسياً بحيث يرتبط اتجاه التيار مع خطوط القوى المغناطيسية بقاعدة اليد اليمنى أو قاعدة البريمة اليمينية كما هو موضح بالشكل (٨ ـ ٣) . ولقد وُجد من التجارب المعملية أن كثافة فيض المجال الناشىء «B» من مرور تيار في سلك مستقيم لا نهائي هي :



شكل (٨ ـ ٣)

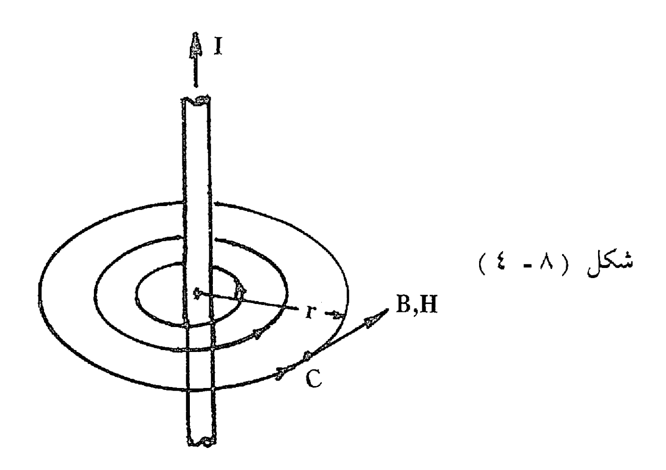
$$B = \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} \quad \ldots\ldots\ldots (8 - 7)$$

حيث r هي بعد المسافة من السلك كما هو مبين بالشكل (٨ ـ ٤) .

٨ ـ ٧ القوة على سلك حامل للتيار في مجال مغناطيسي :

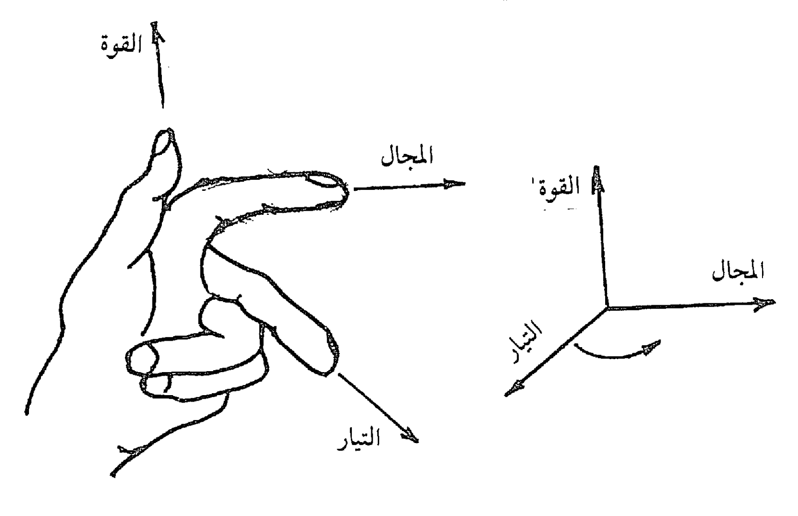
إذا وُضع سلك يمر به تيار «I» عمودياً على مجال مغناطيسي «B» تتولد على هذا السلك قوة «F» عمودية على كل من I و B ومقدارها :

$$F = l.I.B \quad \text{Newton} \quad \text{.......................................} \quad (8 - 8)$$



شكل (٨ ـ ٤)

حيث «l» هو طول السلك . ويحدد العلاقة بين اتجاهات I, B, F قاعدة اليد اليسرى المبينة بالشكل (٨ ـ ٥) .



شكل (٨ ـ ٥)

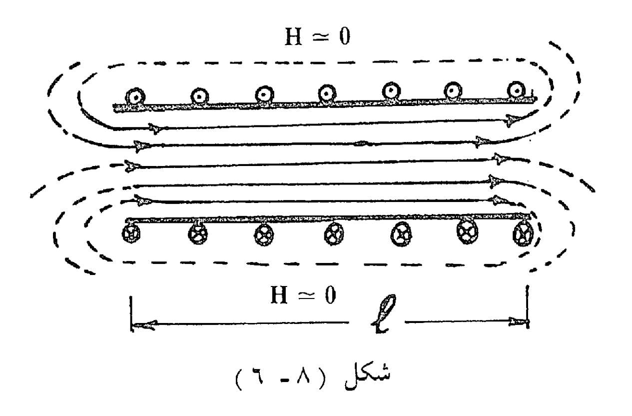
وبصفة عامة ، إذا كان I, B غير متعامدين فإن :

$$\bar{F} = l\, \bar{I} \times \bar{B} \quad \text{.......................................} \quad (8 - 9)$$

$$|F| = l\, IB \;\sin\theta$$

حيث θ هي الزاوية بين I , B . وتدل المعادلة (9 - 8) أن متجه القوة

$\overline{F}$ عمودي على المستوى المكون من متجهي $\overline{I}, \overline{B}$ كما في الشكل (٨ ـ ٥) .



شكل (٨ ـ ٦)

٨ ـ ٨ شدة المجال الناشيء عن تيار في سلك طويل مستقيم :

لو تصورنا سلكاً حاملاً للتيار فإن المجال الناشيء عنه يكون على شكل دوائر كما هو موضح بالشكل (٨ ـ ٤) .

عند وضع وحدة الأقطاب الشمالية عند نقطة C فإن القوة المؤثرة عليه هي H نيوتون ، حيث H شدة المجال عند C . عند تحريك وحدة الأقطاب على محيط دائرة نصف قطرها «r» فإن الشغل المبذول عليها هو $(H.2\pi r)$. وهذا الشغل يساوي التيار المحاط بالمسار الدائري ، أي أن :

$$I = H.2\,\pi\,r \qquad (8 - 10)$$

وبصفة عامة ، إذا أحاط المسار الدائري بعدد من اللفات «N» التي يمر بها تيار I فإن (10 - 8) نأخذ الصورة :

$$NI = H.2\pi r \qquad (8 - 11)$$

المعادلة (11 - 8) تعرف بقانون الشغل ، وهي تأخذ صورة عامة في حالة أي مسار غير دائري وهي :

$$NI = \oint_{\text{المسار المقفل}} \overline{H}.d\overline{r} \qquad (8 - 12)$$

مما سبق ينتج أن :

$$H = \frac{NI}{2\pi r} \quad AT/m \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8 - 13)$$

ووحدة H هنا هي أمبير ـ لفة / متر .

٨ ـ ٩ شدة المجال داخل ملف طولي (Solenoid) :

في الملف الطويل كالموضح بالشكل (٨ ـ ٦) يمكن اعتبار H ثابتة داخل الملف كما يمكن إهمالها خارجة . لو تحرك قطب شمالي شدته الوحدة داخل الملف بطول «l» فإن الشغل المبذول هو $H.\,l$. وبفرض عدد لفات الملف «N» ويمر بها تيار «I» وبتطبيق قانون الشغل ينتج :

$$N.I = H.\,l$$

$$H = \frac{NI}{l} \quad AT/m \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8 - 14)$$

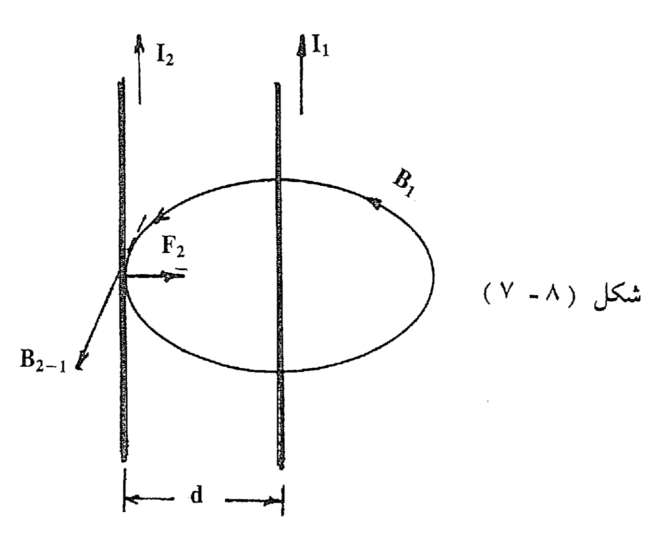
$$B = \frac{\mu NI}{l} \quad wb/m^2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8 - 15)$$

٨ ـ ١٠ القوة بين موصلين حاملين للتيار :

من البديهي أن كلا من الموصلين يقع في المجال المغناطيسي للموصل الآخر . فإذا كانت المسافة بينهما «d- متراً فإن المجال المغناطيسي عند الموصل 2 الناتج من الموصل 1 .

$$B_{2-1} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} \quad Wb/m^2$$

فإذا كان طول كل من الموصلين «l» فإن القوة المؤثرة على الموصل 2 الذي يمر فيه تيار I_2 هي :

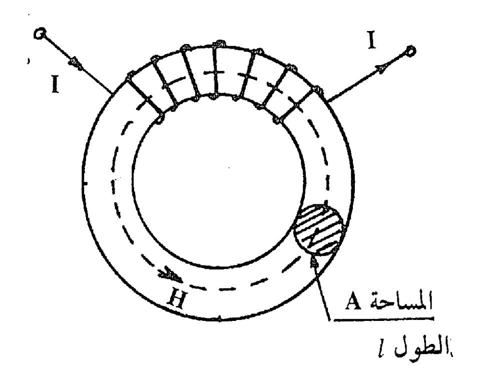


شكل (٨ - ٧)

$$F_2 = l\, I_2\; B_{2-1} \qquad N.$$

$$= \frac{\mu_0\, I_1 I_2\, l}{2\,\pi\, d} \quad N. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (8 - 16)$$

وهي عمودية على المستوى المكون من B, l كما في الشكل (٨ ـ ٧) .
أي أنها قوة تجاذب نحو الموصل 1 .



شكل (٨ ـ ٨)

وبنفس الطريقة يمكن إثبات أن القوة المؤثرة على الموصل 1 هي F_1 مساوية للقوة F_2 ومضادة لها في الاتجاه أي قوة تجاذب نحو الموصل 2 .

وإذا كان إتجاها التيارين مختلفين تتولد بينهما قوة تنافر .

٨ ـ ١١ أمثلة :

مثال ٨ : ١

موصلان طول كل منهما متراً واحداً ويحمل كل منهما تياراً مقدار أمبير واحد . عين قوة التجاذب بينهما .

$$F = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 1 \times 1 \times 1}{2\,\pi \times 1} = 2 \times 10^{-7}\ N.$$

ملحوظة : يمكن تعريف الأمبير تبعاً للنتيجة السابقة بأنه مقدار شدة التيار الذي إذا مر في موصلين طول كل منهما متراً واحداً وتفصل بينهما مسافة متر واحد نشأت بينهما قوة مقدارها 2×10^{-7} نيوتون .

مثال ٨ : ٢

قضيبا توزيع يبعدان عن بعضهما مسافة «30 Cm» يمر في كل منهما تيار مقداره «600 A» في اتجاهين متضادين . عين مقدار القوة بينهما لكل متر طولي . وإذا حدث قصر في الدائرة بحيث زاد التيار فيهما إلى «72000A» فعين مقدار القوة في تلك الحال .

$$F = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 600 \times 600 \times 1}{2\,\pi \times 0.3} = 0.24 \quad N.$$

وهي قوة تنافر بين قضيبي التوزيع . وعند حدوث القصر :

$$F = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 72000 \times 72000 \times 1}{2\,\pi \times 0.3} = 3456 \quad N.$$

يتضح من النتيجة السابقة أن قصر الدائرة قد يؤدي إلى تحطيم قضبان التوزيع نتيجة للزيادة الهائلة في القوى الكهرومغناطيسية .

٨ - ١٢ الدوائر المغناطيسية Magnetic Circuits :

تتكون الدائرة المغناطيسية من مسار مقفل للفيض المغناطيسي الذي يتولد عادة نتيجة لمرور تيار في سلك ملفوف ومحيط بمسار الفيض .

بالإشارة إلى شكل (٨ - ٨) تتكون الدائرة المغناطيسية من الفيض المغناطيسي المار في الحلقة والذي نشأ من مرور التيار «I» في ملف يحتوي «N» لفة .

شدة المجال «H» في قلب الملف :

$$H = \frac{NI}{l} \quad AT/m$$

حيث l طول المسار المغناطيسي :

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

$$= \frac{\mu_0 \mu_r NI}{l} \qquad Wb/m^2$$

وحيث أن :

$$\emptyset = B.A$$

فإذاً :

$$\emptyset = \frac{\mu_0 \mu_r NIA}{l} \quad W$$

$$\emptyset = \frac{NI}{(l/\mu_0 \mu_r A)} = \frac{NI}{S} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (8 - 17)$$

الكمية «$S = \frac{l}{\mu A}$» تُعرف بالمقاومة المغناطيسية Reluctance والكمية «NI» هي القوة الدافعة المغناطيسية Magneto- motive Force .

يتضح من المعادلة (17 - 8) التشابه بينها وبين قانون أوم في الدوائر الكهربية حيث S تناظر المقاومة و NI تناظر القوة الدافعة الكهربية و ∅ تناظر التيار . وبتعميم هذا التشابه بين الدوائر الكهربية والدوائر المغناطيسية يمكن وضع المتشابهات الآتية :

الدائرة الكهربية	الدائرة المغناطيسية
١ ـ التيار بالأمبير I	.... الفيض بالويبر ∅
٢ ـ القوة الدافعة الكهربية بالفولت e	.... القوة الدافعة المغناطيسية بالأمبير لفة
٣ ـ كثافة التيار أمبير / متر٢ J	.... كثافة الفيض بالويبر / متر٢ B
٤ ـ المقاومة بالأوم R	.... المقاومة المغناطيسية أمبير لفة / ويبر S
٥ ـ الموصلية $G = \frac{1}{R}$	.... النفاذية = $\frac{1}{S}$
٦ ـ المقاومة النوعية أوم . متر p	.... المقاومة النوعية المغناطيسية
٧ ـ الموصلية النوعية $\frac{1}{p}$ =	.... النفاذية μ = ١ / المقاومة النوعية المغناطيسية

يجب ملاحظة أن هناك خلافاً أساسياً بين الدائرة الكهربية والدائرة المغناطيسية . فالدائرة الكهربية (يسري) فيها التيار من نقطة معينة حتى يعود إلى نفس النقطة ، أي أن الدائرة الكهربية تمثل سرياناً فعلياً للتيار داخل الدائرة وهو ما يشابه مرور الماء داخل الأنابيب . وعلى العكس من ذلك فالدائرة المغناطيسية (ينشأ) فيها الفيض من نقطة معينة داخل مسار مقفل ويظل هذا الفيض منشأ داخل الدائرة المغناطيسية دون أن يسري داخلها .

وهذا يمكن تشبيهه بالمحافظة على ضغط معين داخل أنبوبة ماء دون دفع الماء أو نقله داخل الأنبوبة . وتبعاً لذلك فإن مرور التيار داخل الدائرة الكهربية يكون مصحوباً بفقد في الطاقة في حين أن إنشاء الفيض في الدائرة المغناطيسية لا يصحبه أي فقد في الطاقة .

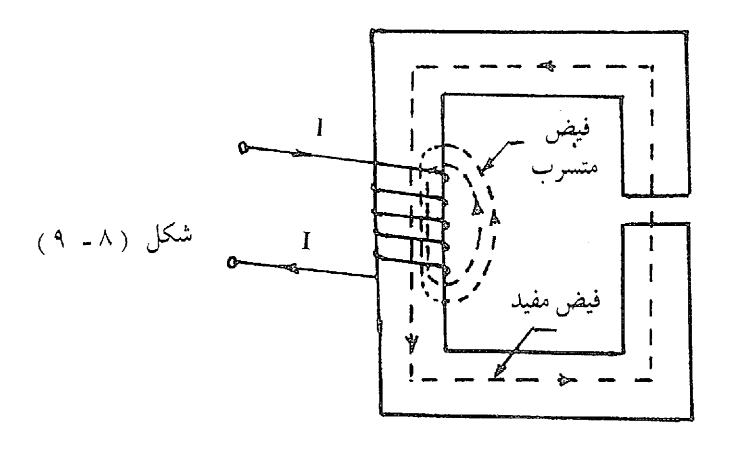
٨ - ١٣ الفيض المتسرب Leakage Flux :

يتسرب جزء من الفيض المغناطيسي الناشىء في دائرة مغناطيسية ويأخذ مسارات عشوائية . ويسمى هذا الجزء بالفيض المتسرب . ويعتبر الفيض المتسرب غير مفيد في الدائرة . يبين الشكل (٨ - ٩) الفيض المتسرب في دائرة مغناطيسية .

يحسب معامل التسرب «λ» Leakage Cœfficient من العلاقة :

$$\text{معامل التسرب} = \frac{\text{الفيض الكلي}}{\text{الفيض المفيد}}$$

$$Y = \frac{\emptyset_{total}}{\emptyset_{useful}} \quad \text{.......................} \quad (8 - 18)$$

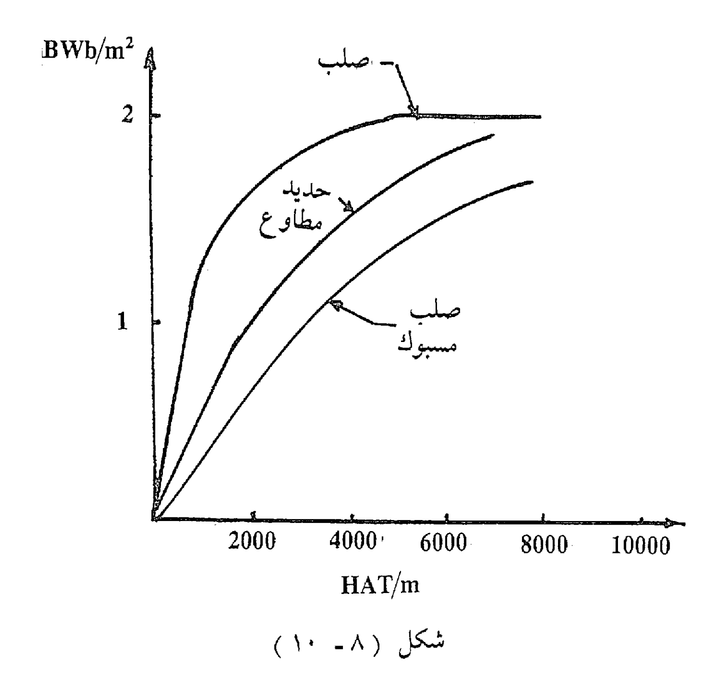


شكل (٨ - ٩)

ويتراوح هذا المعامل في الآلات الكهربية الحديثة بين ١,١ - ١,٢٥ .

٨ ـ ١٤ منحنى المغنطة Magnetisation Curve :

إن النفاذية النسبية μ_r للمواد المغناطيسية لا تكون عادة ثابتة على طول المدى . وإنما تبدأ μ_r في النقصان بعد قيمة معينة لكثافة الفيض B ، وتسمى هذه الحال بالتشبع Saturation . والمنحنى الذي يبين تغير كثافة الفيض B مع شدة المجال H يسمى بمنحنى المغنطة . يبين الشكل (٨ ـ ١٠) منحنيات المغنطة لبعض المواد المغناطيسية .



شكل (٨ ـ ١٠)

نلاحظ من الشكل (٨ ـ ١٠) أن ميل المنحنى يكون كبيراً في الجزء الأول بمعنى أن μ_r تكون مرتفعة عندما تكون B منخفضة وتقل μ_r مع ازدياد B . وكلما زادت قيمة μ_r كلما كانت المادة المغناطيسية أجود .

٨ ـ ١٥ أمثلة :

مثال ٨ : ٣

حلقة حديدية طول محيطها المتوسط ٣ متر ومساحة مقطعها ٢٥ سم٢ وبها

قطع يمثل ثغرة هوائية طولها ١ مم . يحيط بالحلقة ملف به ٣٥٠ لفة . فإذا كان معامل النفاذ النسبي لمادة الحلقة ٨٠٠ وكان معامل التسرب المغناطيسي ١,٢ فأوجد التيار الكهربي اللازم إمراره في الملف للحصول على فيض قدره ٠,٣ مللي ويبر في الثغرة الهوائية .

أولاً : في الثغرة الهوائية :

$$B_g = \frac{\varnothing}{A} = \frac{0.3 \times 10^{-3}}{5 \times 10^{-4}}$$

$$= 0.6 \ \ Wb / m^2$$

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = \frac{0.6}{4\pi \times 10^{-7}}$$

$$= 47.7 \times 10^4 \ \ AT/ m$$

$$AT_g = H_g \times l_g$$

$$= 47.7 \times 10^4 \times 1 \times 10^{-3}$$

$$= 477 \quad AT$$

ثانياً : في الحلقة الحديدية :

$$B_i = \lambda . \frac{\varnothing_g}{A}$$

$$= 1.2 \frac{0.3 \times 10^{-3}}{5 \times 10^{-4}}$$

$$= 0.72 \qquad Wb/m^2$$

$$H_i = \frac{B_i}{\mu_r \, \mu_0}$$

$$H_i = \frac{0.72}{4\pi \times 10^{-7} \times 800} = 715 \quad AT/m$$

$$AT_i = H_i\, l_i$$

$$= 715 \times 3 = 2145 \quad AT$$

الأمبير لفة الكلي :

$$AT_t = 477 + 2145$$

$$= 2622 \quad AT$$

والتيار المطلوب :

$$I = \frac{AT_t}{N}$$

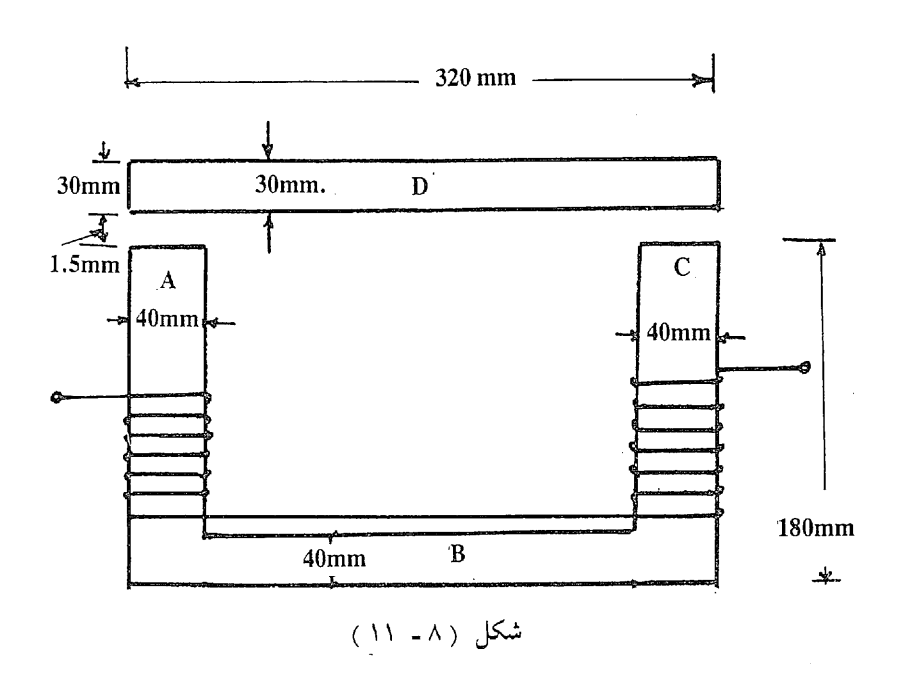
$$= \frac{2622}{350} = 7.5 \text{ Amp.}$$

مثال ٨ : ٤

دائرة مغناطيسية أبعادها كما هو مبين بالشكل (٨ - ١١) . مقطع الأجزاء A و B و C مربع بينما مقطع الجزء D مستطيل (٣٠ × ٤٠ مم) . يمر بالدائرة مجال مغناطيسي ناتج من ملفين على الجزئين A و C وموصلين على التوالي ويحوي كل منهما ١٥٠٠ لفة . إذا كان معاملات النفاذ النسبي لأجزاء القلب الحديدي هي ٩٠٠ للأجزاء A و B و C ، ٧٥٠ للجزء D فأوجد تيار المغنطة اللازم لامرار مجال مغناطيسي ١,٦ ميللي ويبر في الثغرة الهوائية .

أولاً : في الثغرات الهوائية :

$$B_g = \frac{1.6 \times 10^{-3}}{40 \times 40 \times 10^{-6}} = 1 \text{ Wb/m}^2$$



شكل (٨- ١١)

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}}$$

$$= 79.54 \times 10^4 \quad AT/m$$

$$l_g = 2 \times 1.5 = 3 \text{ mm.}$$

$$AT_g = 79.54 \times 10^4 \times 3 \times 10^{-3}$$

$$= 2386 \quad AT$$

ثانياً : الأجزاء A و B و C .

$$B = 1 \quad Wb/m^2$$

$$H = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7} \times 900} = 884 \ AT/m$$

$$l_{mean} = 160 + 280 + 160 = 600 \text{ mm.}$$

$$AT = 884 \times 600 \times 10^{-3} = 530 \quad AT$$

ثالثاً : الجزء D .

$$B = \frac{1.6 \times 10^{-3}}{30 \times 40 \times 10^{-6}} = \frac{4}{3} \quad WB/m^2$$

$$H = \frac{4}{3 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 750} = 1415 \ AT/m$$

$$l_{mean} = 320 - (2 \times 20) = 280 \ mm$$

$$AT = 1415 \times 280 \times 10^{-3} = 396 \ AT.$$

$$\text{Total} \quad AT = 2386 + 530 + 396 = 3312 \quad AT$$

$$I = \frac{3312}{3000} = 1.104 \ A.$$

مثال ٨ : ٥

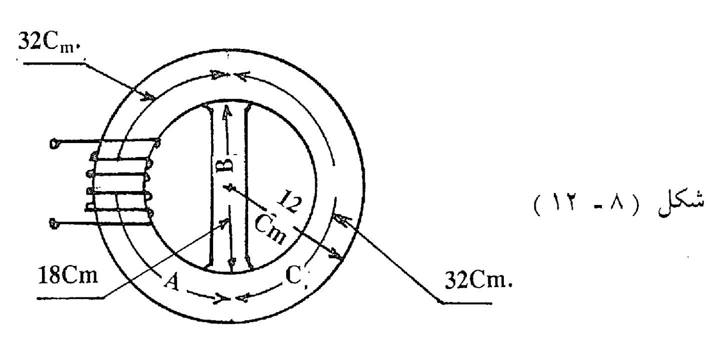
حلقة مصنوعة من الحديد المسبوك بالشكل والأبعاد المبينة بالشكل (٨ ـ ١٢) ومقطعها مربع طول ضلعه ٣ سم ومثبت بداخلها قضيب حديدي طوله ١٨ سم ومقطعه ٤,٠ سم × ٣ سم بدون ثغرات هوائية بينه وبين الحلقة . احسب الأمبير لفات اللازمة على الجزء A للحصول على مجال مغناطيسي كثافته 1 ويبر لكل متر مربع في الجزء C من الحلقة . الخواص المغناطيسية للمواد المستخدمة هي كما يأتي :

الحديد المسبوك :

B	1	1.1	1.2
H	900	1020	1220

الحديد :

B	1.2	1.4	1.45
H	590	1200	1650



شكل (٨ - ١٢)

أولاً : الجزء C .

من الجدول ، عندما تكون $B = 1 \ Wb / m^2$ فإن $H_C = 900 \ AT/m$

طول المسار :

$$l_C = \frac{\pi (24 - 3)}{2} = \frac{66}{2} = 33 \ Cm$$

$$AT_C = 900 \times 0.33 = 297$$

ثانياً : الجزء D..

حيث أن D على التوازي مع C فإن نفس الأمبير لفات موجودة عليه ، أيْ أن :

$$AT_D = 297 = H_D . l_D$$

$$\therefore H_D = \frac{297}{0.18} = 1650 \ AT/m$$

ومن الجدول :

$$B_D = 1.45 \quad Wb/m^2$$
$$\varnothing_C = B_C . A_C$$
$$\varnothing_C = 1 \times 9 \times 10^{-4} = 9 \times 10^{-4} \quad Wb.$$
$$\varnothing_D = B_D . A_D$$
$$= 1.45 \times 0.4 \times 3 \times 10^{-4}$$
$$= 1.74 \times 10^{-4} \quad Wb.$$

$$\varnothing_A = \varnothing_C + \varnothing_D$$

$$= 10.74 \times 10^{-4} \quad Wb$$

$$B_A = \frac{\varnothing_A}{A_A}$$

$$= \frac{10.74 \times 10^{-4}}{3 \times 3 \times 10^{-4}}$$

$$= 1.193 \quad Wb / m^2$$

من الجدول ، وبالتقريب :

$$H_A = 1200 \quad AT/ m$$

$$\therefore \; AT_A = H_A . \, l_A$$

$$= 1200 \times 0.33$$

$$= 396$$

والأمبير لفات الكلية تصبح :

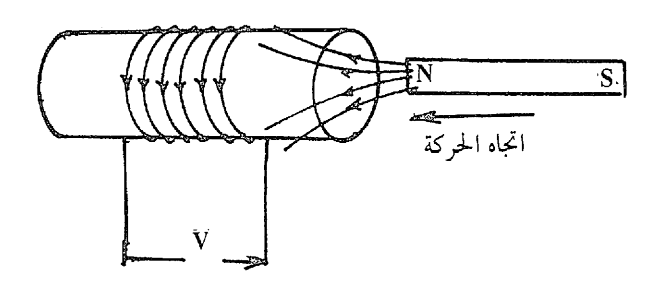
$$AT_t = 396 + 297$$

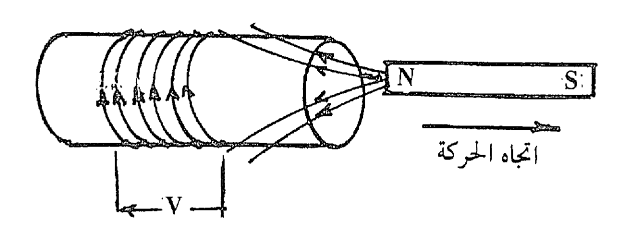
$$= 693 \quad AT.$$

٨ - ١٦ الحث الكهرومغناطيسي **Electromagnetic Induction** :

سبق أن بيَّنا أن التيار الكهربي له مجال مغناطيسي . ولقد بدأ فراداي في عام ١٨٢٢ تجاربه للحصول على التيار الكهربي من المجال المغناطيسي . وبعد تسع سنوات من التجارب المستمرة أمكن له أن يحصل على تيار كهربي من المجال المغناطيسي . ومن الحق علينا أن نذكر أن كل الآلات الكهربية الحديثة من مولدات ومحركات ومحولات ما هي إلا تطبيق لظاهرة الحث الكهرومغناطيسي التي توصل إليها فراداي .

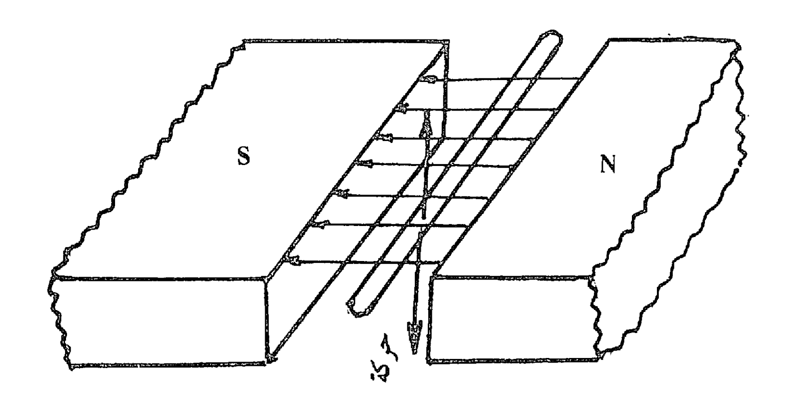
لقد وجد فراداي أنه إذا تحرك قطب مغناطيسي إلى داخل ملف فإنه ينشأ على طرفي الملف فرق جهد تتوقف قيمته على سرعة انتقال القطب المغناطيسي إلى داخل الملف . ويتلاشى هذا الجهد تماماً عند توقف المغناطيس . وينشأ فرق الجهد ثانية في الاتجاه العكسي عند حركة المغناطيس في الاتجاه خارج الملف . وقد تبين من ذلك أنه عندما يتعرض موصل لمجال مغناطيسي متغير تنشأ فيه قوة دافعة كهربية تتناسب قيمتها مع معدل التغير في المجال المغناطيسي بالنسبة للموصل . يبين الشكل (٨ - ١٣) توضيحاً لهذه الظاهرة .





شكل (٨ - ١٣)

وتحدث هذه الظاهرة أيضاً إذا تحرك موصل بين قطبي مغناطيس صعوداً أو هبوطاً كما هو مبين بالشكل (٨ - ١٤) . وتتغير القوة الدافعة الكهربية المنتجة بالحث من الصفر إلى القيمة القصوى في وسط القطبين إلى الصفر صعوداً ثم ينعكس اتجاهها عند تحرك الموصل هبوطاً .



شكل (٨ـ ١٤)

وقد وضع فاراداي هذه الظاهرة في قانونين .

القانون الأول لفراداي :

عندما يتغير المجال المغناطيسي المرتبط بدائرة مغناطيسية فإنه ينتج في هذه الدائرة قوة دافعة كهربية بالحث الكهرومغناطيسي .

وبالتالي فإنه عندما يقطع موصل خطوط مجال مغناطيسي ينتج في هذا الموصل قوة دافعة كهربية بالحث الكهرومغناطيسي .

القانون الثاني لفراداي :

مقدار القوة الدافعة الكهربية المنتجة بالحث الكهرومغناطيسي يتوقف على معدل التغير في الفيض المغناطيسي .

إذا كان لدينا ملف عدد لفاته «N» لفة يرتبط بفيض «∅» فإن القوة الدافعة الكهربية المنتجة بالحث «e» هي :

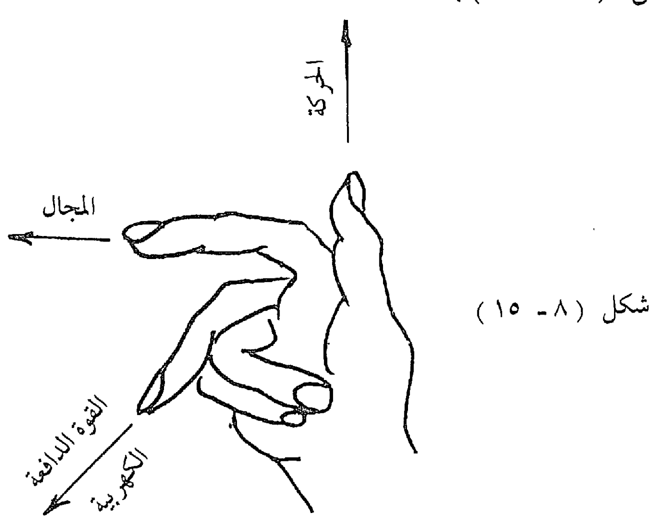
$$e = -\frac{d}{dt}(N\,\varnothing)$$

$$= -N\frac{d\,\varnothing}{dt} \qquad (8 - 19)$$

وتعني الإشارة السالبة أن اتجاه القوة الدافعة الكهربية يسبب تياراً ذا تأثير مغناطيسي معاكس للمجال المغناطيسي الذي أنشأه ، أي أن المجال الأصلي يحاول منع حدوث تغير فيه وبقاء الحال على ما هي عليه . وقد وضع « لنز » هذه القاعدة المسماة باسمه (Lenz's Rule) كما يأتي :

« التيار المنتج بالحث الكهرومغناطيسي يسري دائماً في الاتجاه الذي يجعل فعل المجال المغناطيسي الناتج عنه يكون في اتجاه السبب الذي أدى إلى حدوثه » .

ويمكن تحديد اتجاه القوة الدافعة الكهربية في حالة حركة موصل في مجال مغناطيسي باستخدام قاعدة اليد اليمنى لفلمنج باتباع الطريقة الموضحة بالشكل (٨ـ ١٥).



شكل (٨ـ ١٥)

٨ ـ ١٧ وسائل الحصول على قوة دافعة كهربية بالحث الكهرومغناطيسي :

يمكن الحصول على القوة الدافعة الكهربية عن طريق الحث الكهرومغناطيسي بإحدى وسيلتين :

(أ) الحث الديناميكي .

(ب) الحث الاستاتيكي .

٨ ـ ١٧ ـ ١ الحث الديناميكي Dynamically Induced e.m.f. :

تتولد القوة الدافعة الكهربية عن طريق الحث الديناميكي إذا حدثت حركة نسبية بين الموصل والمجال المغناطيسي . بالإشارة إلى شكل (٨ ـ ١٦ ـ أ) إذا تحرك موصل A طوله «l» في مجال مغناطيسي كثافته «B» عمودياً على اتجاه المجال لمسافة قدرها «dx» ، فإن المساحة التي تمسحها هذه الحركة هي «l.dx» . الفيض «d ∅» الذي تم قطعه أثناء هذه الحركة هو :

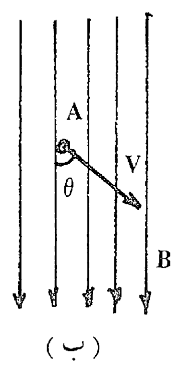
$$d\varnothing = B.\, l\, dx$$

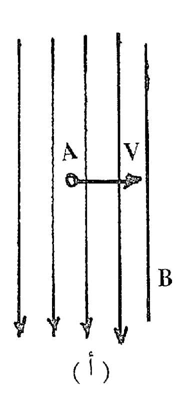
إذا حدثت هذه الحركة في زمن قدره «dt» فإن مقدار القوة الدافعة الكهربية المنتجة ديناميكياً تساوي معدل التغير في الفيض المقطوع بالنسبة للزمن .

$$e = \frac{d\varnothing}{dt}$$

$$= B.\, l.\, \frac{dx}{dt}$$

$$e = B.\, l.\, v \qquad \text{Volts} \quad \dots\dots\dots \quad (8 - 20)$$





شكل (٨ ـ ١٦)

حيث v سرعة الموصل وتساوي $\frac{dx}{dt}$

إذا كانت سرعة الموصل تميل على اتجاه المجال بزاوية θ كما في الشكل (٨ ـ ١٦ ـ ب) فإن :

$$e = B\, l\, v \sin\theta \qquad (8 - 21)$$

ويمكن تحديد اتجاه القوة الدافعة الكهربية باستخدام قاعدة اليد اليمنى كما سبق . ويمكن استخدام العلاقة الاتجاهية الآتية :

$$\bar{e} = l\, \bar{v} \times \bar{B} \qquad (8 - 21)$$

وتستغل فكرة الحث الديناميكي في المولدات الكهربية حيث تولّد القوة الدافعة الكهربية في الموصلات الموجودة على العضو الدوار Rotor نتيجة لدورانها في المجال المغناطيسي للأقطاب .

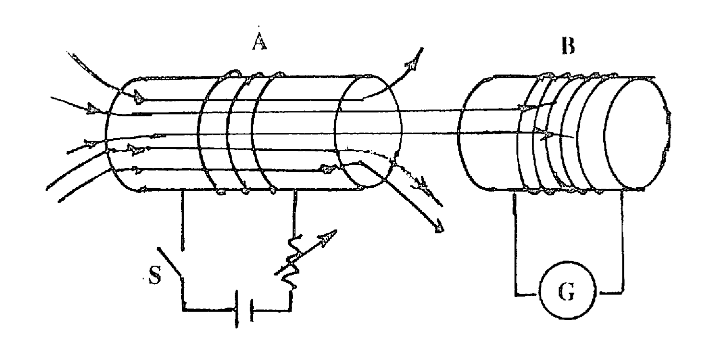
٨ ـ ١٧ ـ ٢ الحث الاستاتيكي

Statically Induced e.m.f.

تتولد القوة الدافعة الكهربية عن طريق الحث الاستاتيكي دون حدوث أي حركة بإحدى طريقتين ؛ الحث التبادلي والحث الذاتي .

(أ) الحث التبادلي **Mutual Induction**

يحدث الحث التبادلي بين ملفين إذا اخترق الفيض الناتج من أحدهما لفات الملف الثاني.بالإشارة إلى الشكل (٨ ـ ١٧) ، الملف B مقفل طرفاه عبر جلفانومتر حساس للتيار . الملف A يتصل ببطارية ومفتاح . عند قفل المفتاح «S» نلاحظ انحراف مؤشر الجلفانومتر لفترة عابرة قصيرة يعود بعدها المؤشر إلى الصفر . وعند فتح المفتاح ينحرف المؤشر إلى الاتجاه الآخر ثم يعود مباشرة إلى الصفر . وتفسير ما حدث هو كما يأتي :



شكل (٨ - ١٧)

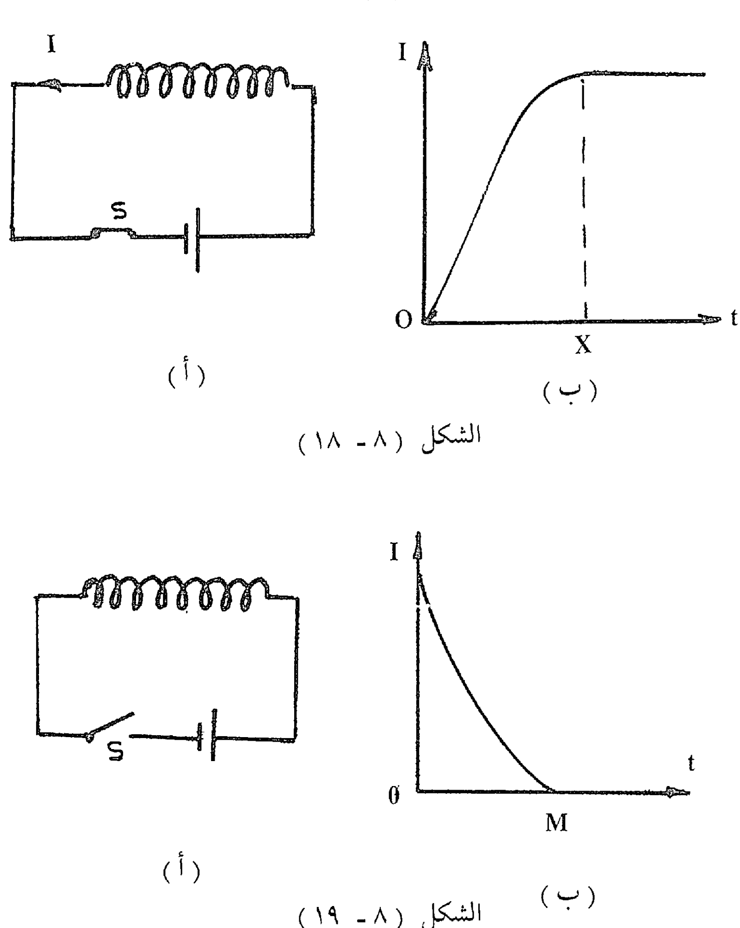
عند قفل المفتاح يمر تيار في الملف A فينتج عنه فيض «$\varnothing_A$» . يخترق جزء من هذا الفيض مقداره «$\varnothing_{BA}$» الملف B وتستغرق هذه العملية فترة صغيرة من الزمن يحدث خلالها تغير في الفيض المخترق للملف B من الصفر حتى القيمة النهائية «$\varnothing_{BA}$» . يحدث نتيجة لذلك قوة دافعة كهربية عبر طرفي الملف B تسبب تياراً في هذا الملف يشعر به الجلفانومتر فينحرف مؤشره . وعند فتح المفتاح يبدأ $\varnothing_{BA}$ في التناقص حتى تتلاشي فتنتج قوة دافعة كهربية في الاتجاه الآخر . وتسمى بالقوة الدافعة الكهربية المنتجة بالحث التبادلي .

(ب) الحث الذاتي Self Induction :

القوة الدافعة الكهربية المنتجة بالحث الذاتي هي فرق الجهد الذي يظهر على طرفي ملف نتيجة لتغير المجال الخاص به والمرتبط به . ويكون اتجاه هذا الجهد بحيث يعاكس أي تغير في المجال المغناطيسي ويسمى لهذا السبب القوة الدافعة الكهربية المعاكسة المنتجة بالحث الذاتي .

لتفسير ظاهرة الحث الذاتي نشير إلى الشكل (٨ - ١٨ - أ) . عند قفل المفتاح لا يصل التيار في الملف إلى قيمته النهائية لحظياً وإنما يحتاج إلى زمن معين مقدار «OX» كما هو مبين بالشكل (٨ - ١٨ - ب) . ومعنى ذلك أن الحث الذاتي للملف قد قاوم التغير في الفيض الموجود فيه عن طريق توليد قوة

دافعة كهربية عكسية تعمل على تكوين فيض معاكس للفيض الأصلي . ويحدث ذلك بطريقة مشابهة تماماً في حالة فتح المفتاح كما هو موضح بالشكلين (٨ـ ١٩ ـ أ) و(٨ـ ١٩ ـ ب) .



الشكل (٨ـ ١٨)

الشكل (٨ـ ١٩)

وخلاصة القول أن ظاهرة الحث الذاتي للملف هي ظاهرة مقاومة التغير في فيض هذا الملف . وهي تشبه ظاهرة القصور الذاتي للأجسام حيث تقاوم الكتلة التغير في سرعة الجسم سواء بالزيادة أو النقصان . وأحياناً يسمى الحث الذاتي بالقصور الذاتي للملف . وكما أن القصور الذاتي للجسم يقاس بالكتلة فإن القصور الذاتي للملف يقاس بكمية تسمى معامل الحث الذاتي «L» (Cœfficient of Self Inductance L) .

٨ ـ ١٨ معامل الحث الذاتي L :

يعطي معامل الحث الذاتي «L» العلاقة بين التيار المار في الملف «I» والفيض المرتبط بالملف «N ∅» على النحو التالي :

$$LI = N\varnothing \quad \text{.........} \quad (8 - 22)$$

$$L = \frac{N\varnothing}{I} \quad \text{Henry} \quad \text{.........} \quad (8 - 23)$$

حيث «N» عدد لفات الملف و ∅ الفيض المار به . ووحدة L هي الهنري وهي تكافىء الويبر . لفة / أمبير .

ويعطي معامل الحث الذاتي العلاقة بين القوة الدافعة الكهربية العكسية «e» ومعدل التغير في تيار الملف كما يأتي :

$$LI = N\varnothing$$

$$L\frac{di}{dt} = N\frac{d\varnothing}{dt}$$

$$= -e$$

$$\therefore e = L\frac{di}{dt} \quad H \quad \text{.........} \quad (8 - 24)$$

ويمكن حساب L للملف الطولي بالإستعانة بالمعادلة (15 - 8) كما يأتي :

$$B.A = \varnothing = \frac{\mu NI_A}{l}$$

حيث «A» مساحة مقطع الملف :

$$\frac{N\varnothing}{I} = \frac{\mu N^2 A}{l}$$

$$\therefore\ L = \mu N^2 A / l$$

$$L = \frac{N^2}{(l/\mu A)}$$

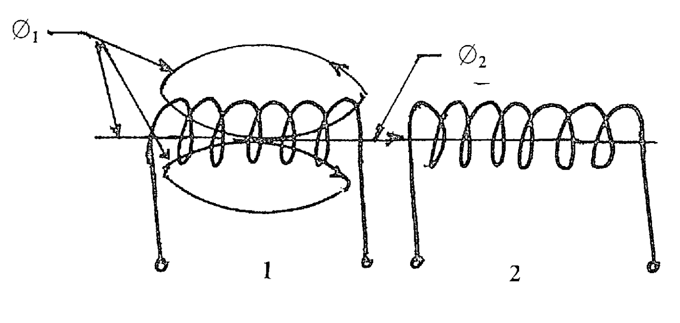
$$L = \frac{N^2}{S} \quad H \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (8 - 25)$$

حيث «S» هي المقاومة المغناطيسية للملف كما سبق ذكره في البند ٨ - ١٢ .

٨ - ١٩ معامل الحث التبادلي

Cœfficient of Mutual Inductance M:

بالرجوع إلى بند ٨ - ١٧ - ٢ يمكن تعريف الحث التبادلي على أنه ظاهرة ظهور قوة دافعة كهربية عكسية على طرفي ملف نتيجة لتغير التيار في ملف آخر مجاور له . بالإشارة إلى شكل (٨ - ٢٠) .



الشكل (٨ - ٢٠)

$$e_{2-1} = - N_2 \frac{d\,\varnothing_{2-1}}{dt} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (8 - 26)$$

حيث :

$\varnothing_{2-1}$: الفيض المار في الملف 2 نتيجة والمولد في الملف 1 .

e_{2-1} : القوة الدافعة الكهربية العكسية في الملف 2 الناتجة من $\varnothing_{2-1}$

ويرتبط $\varnothing_{2-1}$ مع I_1 بالعلاقة :

$$MI_1 = N_2 \varnothing_{2-1} \quad \text{.......} \quad (8-27)$$

حيث M هو معامل الحث التبادلي بين الملفين . أي أن :

$$M \frac{dI_1}{dt} = N_2 \frac{d\varnothing_{2-1}}{dt} \quad \text{.......} \quad (8-28)$$

$$\therefore e_{2-1} = -M \frac{dI_1}{dt} \quad \text{.......} \quad (8-29)$$

في حالات كثيرة يمكن اعتبار الفيض $\varnothing_{2-1}$ مساوياً للفيض $\varnothing_1$. وفي هذه الحال تأخذ المعادلة (26 - 8) الصورة :

$$e_{2-1} = -N_2 \frac{d\varnothing_1}{dt} \quad \text{.......} \quad (8-30)$$

والمعادلة (27 - 8) تصبح :

$$MI_1 = N_2 \varnothing_1$$

$$M = \frac{N_2 \varnothing_1}{I_1} \quad \text{.......} \quad (8-31)$$

يمكن ايجاد معامل الحث التبادلي لملفين طوليين متساويين في الطول «l» ومساحة المقطع «A» وعدد لفات الأول «N_1» والثاني «N_2» كما يأتي :

$$\varnothing_1 = \frac{N_i I_1}{S}$$

$$\frac{N_2 \varnothing_1}{I_1} = \frac{N_1 N_2}{S}$$

$$\therefore M = \frac{N_1 N_2}{S} \quad H. \quad \text{.......} \quad (8-32)$$

حيث :

$$\varnothing_{2-1} = \varnothing_1$$

نفرض الآن أن الحث الذاتي للملفين هما L_1 و L_2 . باستعمال (8 - 32) .

$$M^2 = \frac{N_1^2\, N_2^2}{S.\, S} = L_1\, L_2$$

$$M = \sqrt{L_1\, L_2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8 - 33)$$

تسري المعادلة (33 - 8) إذا كان الفيض المتولد في أحد الملفين يخترق كله الملف الآخر ؛ أي أن :

$$\varnothing_{2-1} = \varnothing_1, \ \varnothing_{1-2} = \varnothing_2$$

وفي حالة عدم اختراق $\varnothing_1$ كله الملف 2 ، وكذلك بالنسبة للفيض $\varnothing_2$ فإن المعادلة (33 - 2) تأخذ الصورة التالية :

$$M = K \sqrt{L_1\, L_2} \quad H \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8 - 34)$$

يسمي الثابت «K» معامل الربط المغناطيسي Cœfficient of Magnetic Coupling وهو يتراوح بين الصفر والواحد الصحيح .

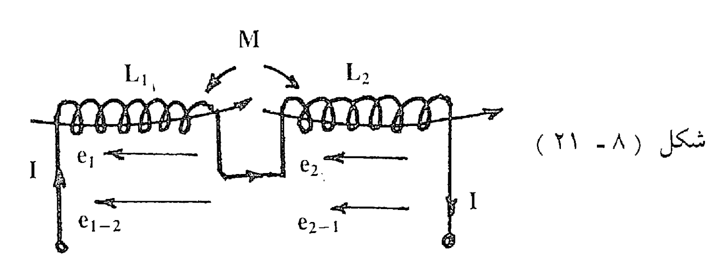
٨ ـ ٢٠ المحاثات على التوآلي :

تُوصل المحاثات على التوالي بحيث يكون الفيضان إما في اتجاه واحد كما في الشكل (٨ ـ ٢١) أو متعاكسين كما في الشكل (٨ ـ ٢٢) .

(أ) الفيضان في اتجاه واحد :

القوة الدافعة في الملف (1) بالحث الذاتي :

$$e_1 = -L_1 \frac{dI}{dt}$$



شكل (٨ - ٢١)

القوة الدافعة في الملف (1) بالحث التبادلي مع الملف (2) .

$$e_{1-2} = -M \frac{dI}{dt}$$

القوة الدافعة في الملف (2) بالحث الذاتي :

$$e_2 = -L_2 \frac{dI}{dt}$$

القوة الدافعة في الملف (2) بالحث التبادلي مع الملف (1) .

$$e_{2-1} = -M \frac{dI}{dt}$$

القوة الدافعة الكلية على الطرفين :

$$e = -(L_1 + L_2 + 2M) \frac{dI}{dt}$$

والمحاثة المكافئة للمحاثتين (1) و (2) هي «L» حيث :

$$e = -L \frac{dI}{dt}$$

وبذلك ينتج أن :

$$L = L_1 + L_2 + 2\,M \quad \text{.........} \quad (8 - 35)$$

(ب) الفيضان في اتجاهين متعاكسين :

$$e_1 = -\,L_1 \frac{dI}{dt}$$

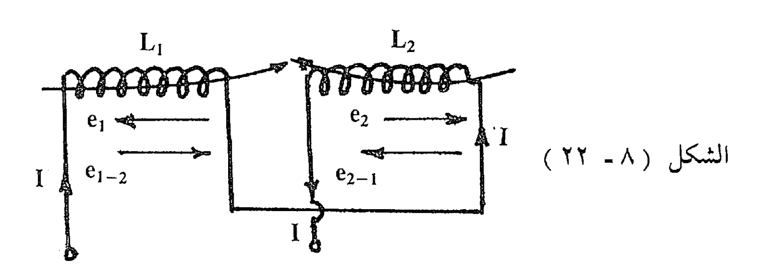
$$e_{1-2} = +\,M \frac{dI}{dt}$$

$$e_2 = -\,L \frac{dI}{dt}$$

$$e_{2-1} = +\,M \frac{dI}{dt}$$

$$e = -\,(L_1 + L_2 - 2M) \frac{dI}{dt}$$

$$e = -\,L \frac{dI}{dt}$$



الشكل (٨ ـ ٢٢)

المحاثة المكافئة «L» تصبح :

$$L = L_1 + L_2 - 2\,M \quad \text{.........} \quad (8 - 36)$$

٨ ـ ٢١ المحاثات على التوازي :

بالإشارة إلى الشكل (٨ ـ ٢٣) ، إذا كانت «L» هي المحاثة المكافئة :

$$I = I_1 + I_2$$

شكل (٨ - ٢٣)

$$\frac{dI}{dt} = \frac{dI_1}{dt} + \frac{dI_2}{dt} \quad \text{......} \quad (8-37)$$

$$e_1 = e_2 = e \quad \text{......} \quad (8-38)$$

$$e_1 = -L_1 \frac{dI_1}{dt} - M\frac{dI_2}{dt} \quad \text{......} \quad (8-39)$$

$$e_2 = -L_2 \frac{dI_2}{dt} - M\frac{dI_1}{dt} \quad \text{......} \quad (8-40)$$

$$\therefore L_1 \frac{dI_1}{dt} + M\frac{dI_2}{dt} = L_2 \frac{dI_2}{dt} + M\frac{dI_1}{dt}$$

$$\frac{dI_1}{dt} (L_1 - M) = \frac{dI_2}{dt} (L_2 - M)$$

$$\frac{dI_1}{dt} = \left(\frac{L_2 - M}{L_1 - M}\right)\frac{dI_2}{dt} \quad \text{......} \quad (8-41)$$

$$e = -L\frac{dI}{dt} \quad \text{......} \quad (8-42)$$

وباستخدام المعادلتين (38 - 8) و (39 - 8) مع المعادلة (42 - 8) ينتج :

$$L\frac{dI}{dt} = L_1 \frac{dI_1}{dt} + M\frac{dI_2}{dt} \quad \text{......} \quad (8-43)$$

وبالتعويض من (41 - 8) في (43 - 8) .

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{L} [L_1 (\frac{L_2 - M}{L_1 - M}) + M] \frac{dI_2}{dt} \quad \text{.......................} (8 - 44)$$

وباستخدام (37 - 8) و(41 - 8) يمكن كتابة :

$$\frac{dI}{dt} = [\frac{L_2 - M}{L_1 - M} + 1] \frac{dI_2}{dt} \quad \text{.....................................} (8 - 45)$$

وأخيراً من المعادلتين (44 - 8) و(45 - 8) ينتج :

$$\frac{L_2 - M}{L_1 - M} + 1 = \frac{1}{L} [L_1 (\frac{L_2 - M}{L_1 - M}) + M]$$

ومنها ينتج أن المحاثة المكافئة هي :

$$L = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2 M} \quad \text{...} (8 - 46)$$

وتسري المعادلة (46 - 8) إذا كان الحث التبادلي يساعد الحث الذاتي .

أما إذا كان الحث التبادلي يعاكس الحث الذاتي فإن L تصبح :

$$L = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M} \quad \text{..} (8 - 47)$$

٨ ـ ٢٢ أمثلة :

مثال ٨ : ٦

حلقة دائرية من الحديد مساحة مقطعها ١ سم ومتوسط طولها ٤٠ سم وملفوف عليها ملف به ٤٠٠٠ لفة . إذا مرَّ تيار مقداره ٢/١ أمبير في الملف فإن كثافة الفيض في الحلقة تكون ٤,٠ ويبر / متر٢ . أوجد النفاذية النسبية لمادة الحلقة والحث الذاتي للملف .

$$H = \frac{NI}{l} \quad AT/m$$

$$= \frac{4000 \times 0.5}{0.40} = 5000 \ AT/m$$

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{0.4}{5000} = 8 \times 10^{-5}$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$$\mu_r = \frac{8 \times 10^{-5}}{4\pi \times 10^{-7}} = 63.69$$

$$L = \frac{N \varnothing}{I}$$

$$= \frac{N.B.A}{I}$$

$$= \frac{4000 \times 0.4 \times 0.01}{0.5} = 32 \ H.$$

مثال ٨ ـ ٧ :

في المثال السابق ، فُتِحت دائرة الملف فأدّى ذلك إلى اضمحلال المجال داخل الحلقة . لوحظ أنه بعد مرور ٥٠٠ ميكروثانية من لحظة القفل كانت كثافة الفيض تساوي ٠,٣٩ ويبر / متر[٢] . على فرض أن معدل الإضمحلال كان ثابتاً فما هو فرق الجهد العكسي الذي يظهر بين طرفي الملف ؟

حيث أن :

$$e = -N \frac{d\varnothing}{dt} = -N.A \frac{dB}{dt}$$

$$dB = 0.01 \quad , \ dt = 500 \times 10^{-6}$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{0.01}{500 \times 10^{-6}} = 20$$

فيكون فرق الجهد العكسي هو :

$$e = -4000 \times 0.01 \times 20$$
$$= -800 \text{ Volt}$$

ملحوظة :

يتضح من النتيجة السابقة أنه بمجرد فتح دائرة محاثة ينشأ فرق جهد عكسي عابر بين طرفي المحاثة . ومقدار هذا الجهد قد يكون أضعاف الجهد الأصلي الذي كان موجوداً بين طرفي المحاثة . وقد يسبب ذلك إنشاء قوس كهربي بين طرفي المحاثة وخصوصاً في حالة الجهود العالية . ويواجه المهندسون هذه المشكلة على نطاق واسع في تصنيع قواطع الدوائر (Circuit Breaker) التي تعمل على جهود عالية أو فائقة .

مثال ٨ : ٨

إذا كان الحث الذاتي لملف به ٥٠٠ لفة هو ٠,٢٥ هنري ، وإذا كان ٦٠٪ من الفيض الناتج من هذا الملف يخترق ملفاً آخر به ١٠٠٠٠ لفة . احسب الحث التبادلي للملفين والقوة الدافعة الكهربية المتولدة في الملف الثاني عندما يتغير التيار في الملف الأول بمعدل ١٠٠ أمبير في الثانية .

$$L_1 = \frac{N_1 \varnothing_1}{I_1}$$

$$\frac{\varnothing_1}{I_1} = \frac{0.25}{500} = 5 \times 10^{-4} \text{ Wb / A.}$$

$$\varnothing_{2-1} = 0.6 \varnothing_1$$

$$M = N_2 \frac{\varnothing_{2-1}}{I_1} = N_2 . \frac{0.6 \varnothing_1}{I_1}$$

$$= 10000 \times 0.6 \times 5 \times 10^{-4} = 3 \text{ H.}$$

$$e_{2-1} = M \frac{dI_1}{dt}$$

$$= 3 \times 100 = 300 \text{ Volts}$$

مثال ٨ : ٩

حلقة من الخشب متوسط طول المسار المغناطيسي بها ١٠٠ سم ومساحة مقطعه ١٠ سم[٢] . لُفَّ ملف حول الحلقة يحتوي على ٢٠٠٠ لفة ثم لُفَّ بجواره ملف آخر يحتوي على ٤٠٠٠ لفة وأُخرجت أطراف كل ملف على حدة .

(أ) أوجد الحث الذاتي لكل ملف على حدة .

(ب) إذا وصل الملفان على التوالي بحيث كان فيضاهما في نفس الاتجاه فأوجد قيمة الحث الذاتي للمجموعة على فرض أن معامل الربط $K = 1$.

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{AN_1^2}{l}$$

$$L_1 = 4\pi \times 10^{-7} \times 1 \times \frac{0.001 \times (2000)^2}{1}$$

$$= 5.03 \text{ m.H.}$$

$$L_2 = 4\pi \times 10^{-7} \times 1 \times \frac{0.001 \times (4000)^2}{1}$$

$$= 20.11 \quad \text{m.H.}$$

$$M = \sqrt{L_1 L_2} = 10.06 \quad \text{m.H.}$$

$$L = L_1 + L_2 + 2M$$
$$= 5.03 + 20.11 + 2 \times 10.06$$
$$= 45.26 \quad \text{m.H.}$$

مثال ٨ : ١٠

إذا كان «L_1» و «L_2» هما معاملي الحث الذاتي لملفين وكان الحث الذاتي الكلي للملفين عند توصيلهما على التوالي هو ١ هنري أو ٠,٢ هنري معتمداً على اتجاه التيار في الملفين بالنسبة لبعضهما . احسب قيمة الحث التبادلي بين الملفين .

$$L = L_1 + L_2 \pm 2\,M$$
$$1 = L_1 + L_2 + 2M$$
$$0.2 = L_1 + L_2 - 2M$$

وبالطرح ينتج :

$$0.8 = 4\,M$$
$$M = 0.2\,M$$

٨ ـ ٢٣ التخلف المغناطيسي Magnetic Hysteresis :

التخلف المغناطيسي هو ظاهرة تحدث في المواد المغناطيسية حيث تظهر على صورة تخلف كثافة الفيض الناتج بالتأثير «B» عن شدة المجال المغناطيسي المسبب لها «H» .

يمكن توضيح ظاهرة التخلف المغناطيسي عن رسم منحنى لتغير كثافة الفيض B مع تغير شدة المجال «H» وذلك لقلب حديدي موجود داخل ملف كالموضح بالشكل (٨ ـ ٢٤ ـ أ) كما يأتي :

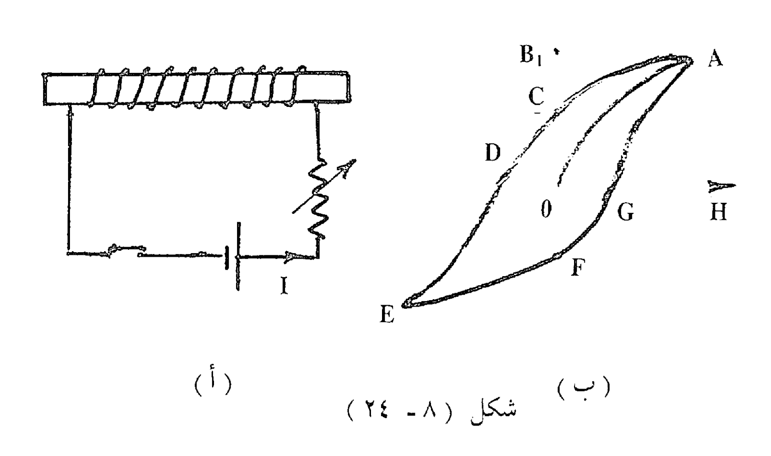
١ ـ نبدأ بالقيمة $H = 0$ و $B = 0$. بزيادة H (عن طريق زيادة تيار الدائرة) تزداد B على المنحنى 0A حتى تصل إلى القيمة B_1 (شكل ٨ ـ ٢٤ ـ ب) .

٢ ـ بتقليل H تدريجياً تقل قيمة B ولكن على المنحنى CA بحيث أنه عند انعدام H يكون في القلب الحديدي كثافة فيض مقداره $B_2 = 0C$ ،

وهذا يمثل مقدار قدرة مادة القلب على الإحتفاظ بالمغناطيسية . وتسمى B_2 بخاصية الإحتفاظ (Retentivity) أو التبقي (Remanence) للمادة .

٣ ـ لإزالة المغناطيسية المتبقية في القلب الحديدي نؤثر بقوة مغنطة سالبة أي نعكس اتجاه التيار في الدائرة ثم نرفع قمة H حتى القيمة 0D فنجد أن B تتحرك على المنحنى حتى تصل إلى الصفر عند D . تُمثل الكمية 0D بقوة المغنطة للمادة (Cœrcive Force) .

٤ ـ لو استمرت الزيادة في قيمة H في الاتجاه السالب تتحرك B على الجزء DE . ثم بإعادة H إلى الصفر تتحرك B على المنحنى EF . وبالإستمرار في زيادة H تتحرك B من F إلى G إلى A .



(أ) (ب)
شكل (٨ ـ ٢٤)

يتضح مما سبق أن كثافة الفيض B تكون دائماً متخلفة عن H . ويتكرر ذلك كلما تغير اتجاه قوة المغنطة H بحيث تتحرك العلاقة على المنحنى (GACDEFG) الذي يمثل حلقة مغلقة تسمى حلقة التخلف المغناطيسي .

لحساب الطاقة المستنفذة في عملية مغنطة القلب على حلقة التخلف المغناطيسي . قدرة المصدر هي ei وات حيث i التيار و e القوة الدافعة الكهربية للمصدر وذلك عند أي لحظة t . والطاقة المستنفذة من المصدر في

زمن قدرة dt هي eidt . فإذا كان الزمن المستغرق في رسم حلقة التخلف هو t فإن الطاقة المسحوبة من المصدر هي W حيث :

$$W = \int_0^t eidt$$

وحيث أن مقدار e هو :

$$e = N \frac{d\varnothing}{dt}$$

$$= N A \frac{dB}{dt}$$

حيث A هي مساحة مقطع القلب . والتيار i يرتبط بشدة المجال H بالعلاقة .

$$Ni = H.\,l$$

حيث l هي طول القلب الحديدي . وبذلك :

$$W = \int_0^t NA \frac{dB}{dt} \cdot \frac{H.l}{N} \,.dt$$

$$= \int_0^t (Al) \;H\, dB$$

$$\therefore \frac{W}{(Al)} = \int_0^t H\, dB \qquad \text{Joule} / m^3 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8 - 48)$$

الطرف الأيمن من المعادلة (48 - 2) هو مساحة منحنى التخلف المبين بالشكل (٨ - ١٦ - ب) . والطرف الأيسر هو الطاقة المفقودة لوحدة الحجوم . نستنتج من ذلك أن التخلف المغناطيسي يستهلك طاقة من المصدر تسمى بفقد التخلف .

٨ - ٢٣ - ١ قانون ستاينميتز **Steinmetz Law** :

باختيار عدة مواد مغناطيسية مختلفة وجد ستاينميتز أن الفقد الناتج عن

التخلف المغناطيسي يعتمد على قيمة كثافة الفيض وعلى النوعية المغناطيسية للمادة . وقد وضع لهذه العلاقة معادلة تجريبية تعطي قيمة الفقد الناتج عن التخلف W_h على الصورة :

$$W_h = k\, B_{max}^{1.6}\ \text{Joule / m}^3\text{ / Cycle} \quad (8 - 49)$$

حيث k ثابت يعتمد على نوع المادة ويسمى معامل ستاينميتز . أما الرقم ١,٦ فهو رقم وُجد نتيجة للتجارب وهو ثابت إذا كانت قيمة B_{max} بين (١,٠ - ١,٢) ويبر لكل متر مربع . أما إذا خرجت قيمة B_{max} عن هذا المدى سواء بالزيادة أو النقصان فإن الرقم يزيد عن ١,٦ .

إذا فرضنا أن حجم المادة المغناطيسية هو «V» متر٣ وأن تردد التيار المغذي هو «f» هرتز فإن الطاقة المفقودة في الثانية نتيجة للتخلف هي :

$$W_h = k\, B_{max}^{1.6}\, .f.V \qquad \text{Watt}$$

وفيما يلي قيمة k لبعض المواد المغناطيسية :

الحديد الزهر : ٢٧ - ٤٠ .
الحديد الصلب : ١٠ .
مسبوكات الحديد المطاوع : ٧,٥٤ - ٢٢,٦ .
شرائح صلب الدينامو : ٥,٠٢ .
النيكل : ٣٢ - ١٠٠ .
السبائك المغناطيسية : ٠,٢٥ .

٨ - ٢٤ الطاقة المختزنة في المجال المغناطيسي :

لإنشاء مجال مغناطيسي من ملف كهربي يجب سحب كمية من الطاقة الكهربية من هذا الملف حيث تتحول هذه الطاقة إلى طاقة مختزنة داخل المجال المغناطيسي . وهذه الطاقة تتشابه مع الطاقة اللازمة لرفع كتلة مسافة معينة حيث تتحول هذه الطاقة إلى طاقة وضع مختزنة في وزن هذه الكتلة .

يمكن حساب الطاقة المختزنة في المجال المغناطيسي كما يأتي .

$$dW = e.i.dt \quad \text{.........} \quad (8 - 50)$$

حيث :

dW : الطاقة المسحوبة من المصدر الكهربي في فترة زمنية صغيرة dt .

e : جهد المصدر الكهربي عند أي لحظة .

i : التيار المار في الملف عند اللحظة .

إذا استمرت عملية إنشاء المجال المغناطيسي فترة زمنية مقدارها t .

$$W = \int_0^t dW = \int_0^t e.i.dt$$

وحيث أن $e = L\frac{di}{dt}$ ، حيث L محاثة الملف .

$$\therefore W = \int_0^t L\frac{di}{dt}.idt$$

$$= \int_0^I L.i.di$$

$$W = \frac{1}{2}LI^2 \quad \text{Joules} \quad \text{.........} \quad (8 - 51)$$

حيث «I» هي القيمة النهائية للتيار بعد زمن t .

يمكن إيجاد قيمة الطاقة المختزنة في المجال المغناطيسي المعطاة بالمعادلة (8 - 51) بدلالة كثافة فيض المجال «B» وشدة المجال H كما يأتي :

$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

$$= \frac{1}{2}\frac{N\varnothing}{I}.I.\frac{H.l}{N}$$

$$= \frac{1}{2} B.H. (Al)$$

$$W / m^3 = \frac{1}{2} B.H \qquad J/ m^3 \quad \dots\dots\dots\dots \quad (8 - 51)$$

حيث A ، l مساحة وطول منطقة المجال .

٨ ـ ٢٥ القوة بين قطبين مغناطيسيين :

بالإشارة إلى شكل (٨ ـ ٢٥) يمكن حساب قوة الجذب بين قطبي المغناطيس كما يأتي :

إذا كانت مساحة وجه المغناطيس «A» والمسافة بين القطبين «l» فإن الطاقة المختزنة داخل هذا المجال من المعادلة (51 - 8) هي :

$$W = \frac{1}{2} B.H. (Al) \qquad \text{Joule}$$

شكل (٨ ـ ٢٥)

نفرض الآن أن القطب N قد تحرك مسافة صغيرة «dx» بعيداً عن القطب S . الزيادة في الطاقة المختزنة هي :

$$dW = \frac{1}{2} B.H.A.dx \quad \dots\dots\dots\dots \quad (8 - 52)$$

هذه الزيادة في الطاقة قد اكتسبها المجال عن طريق التأثير بقوة خارجية «P» تساوي قوة التجاذب بين القطبين حيث تحركت P مسافة dx . وعلى ذلك يجب أن تتساوى الزيادة في الطاقة dW مع شغل القوة P ، أي أن :

$$P.dx = dW$$

$$\therefore P.dx = \frac{1}{2}B.H.A.dx$$

$$\therefore P = \frac{1}{2}B.H.A$$

$$\therefore P / A = \frac{1}{2}B.H \qquad \text{Newton} / m^2 \; \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \; (8 - 53)$$

وهي القوة بين القطبين على وحدة مساحات القطب .

٨ ـ ٢٦ أمثلة :

مثال ٨ : ١١

إحسب الطاقة المفقودة في الثانية نتيجة للتخلف المغناطيسي في قلب حديدي وزنه ٥٠,٨٦ كيلوجرام موضوع في مولد ذي أربعة أقطاب ويعطي تردداً مقداره ٥٠ ذبذبة / ثانية . كثافة الفيض تتغير بين ± ٠,٣ ويبر لكل متر مربع ومعامل التخلف ٣٧٦,٨ جول / م٣ وكثافة المعدن ٧,٧٥ جرام / سم٣ .

$$W_h = k.B_{max}^{1.6}.f.V \qquad \text{Watts}$$

$$V = \frac{50.86 \times 10^{-6}}{7.75 \times 10^{-3}} = 6.561 \times 10^{-3}\ m^3$$

$$W_h = 376.8 \times (0.3)^{1.6} \times 50 \times 6.561 \times 10^{-3}$$
$$= 18\ J / S = 18\ W.$$

مثال ٨ : ١٢

إذا كانت مساحة حلقة التخلف المغناطيسي لمادة مغناطيسية ٦٠ سم٢ وكان مقياس الرسم على الإحداثيين كالآتي :

H axis: 1 Cm. = 200 AT/ m.

B axis: 1 Cm. = 0.2 Wb / m².

أوجد قيمة الفقد بالوات لكل كيلوجرام إذا كان التردد ٥٠ ذبذبة في الثانية وكثافة المادة المغناطيسية ٨ جرام / سم٣ .

الفقد المغناطيسي = مساحة حلقة التخلف × مقياس رسم H × مقياس رسم B .

$= 60 \times 200 \times 0.2 = 2400$ جول / م٣ / ذبذبة .

حجم المادة لكل كيلوجرام = $\frac{1 \times 10^{-6}}{8 \times 10^{-3}} = \frac{10^{-3}}{8}$ م٣

الفقد لكل كيلوجرام = $2400 \times \frac{10^{-3}}{٨} = 0.3$ جول / ذبذبة

الفقد في الثانية = $0.3 \times 50 = 15$ جول / ثانية .

٨ ـ ٢٧ التيار في الدوائر الحثية :

بالإشارة إلى الدائرة المبينة بالشكل (٨ ـ ٢٦) نفرض أن المفتاح «S» قد وُصل للوضع (1) عندما كان $t = 0$.

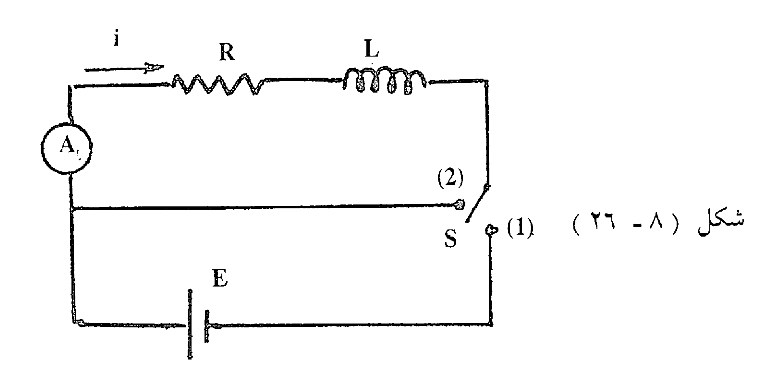
معادلة الدائرة هي :

$$E = iR + L\frac{di}{dt}$$

$$\int_0^i \frac{di}{E - iR} = \frac{1}{L}\int_0^t dt$$

$$\left[- ln\,(E - iR)\right]_0^i = \frac{t}{L}$$

$$ln\ \frac{E - iR}{E} = -\frac{t}{L}$$



شكل (٨ - ٢٦)

ومنها ينتج :

$$i = \frac{E}{R}(1 - e^{-t/\lambda}) \qquad (8 - 54)$$

حيث :

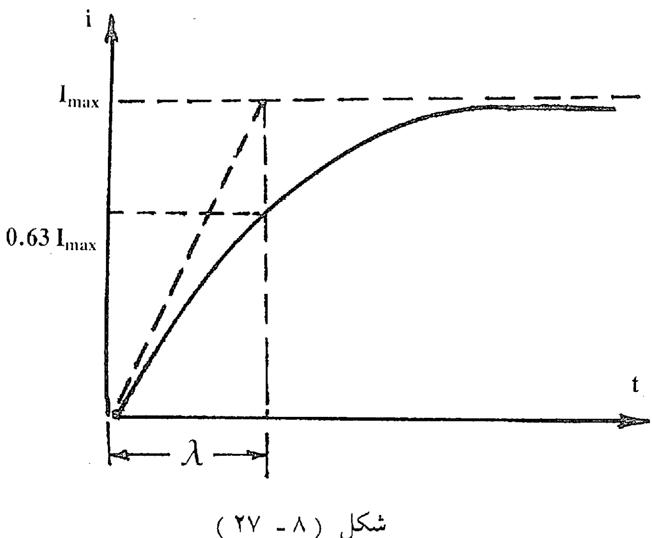
$$\lambda = \frac{L}{R} \qquad (8 - 55)$$

و λ هي الثابت الزمني للدائرة ووحدتها الثانية . والقيمة القصوى للتيار هي القيمة $\frac{E}{R}$ ويصل إليها بعد زمن لا نهائي من الناحية النظرية .

$$I_{max} = \frac{E}{R} \qquad (8 - 56)$$

أي أن :

$$i = I_{max}\,(1 - e^{-t/\lambda}) \qquad (8 - 57)$$



شكل (٨ - ٢٧)

ويلاحظ أن معدل الزيادة في التيار يكون مرتفعاً في البداية ويقل تدريجياً حتى يصل إلى الصفر بعد زمن لا نهائي . بتفاضل المعادلة (57 - 8) بالنسبة للزمن ينتج :

$$\frac{di}{dt} = I_{max} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-t/\lambda}$$

وعند $t = 0$.

$$\frac{di}{dt}\Big|_0 = \frac{1}{\lambda} \cdot I_{max}$$

$$= \frac{R}{L} \cdot \frac{E}{R} = \frac{E}{L} \qquad (8 - 58)$$

وهذه الكمية تساوي ميل المماس لمنحنى التيار المبين بالشكل (٨ - ٢٧) .

نلاحظ أن المماس للمنحنى عند نقطة الأصل تقطع الخط $i = I_{max}$ عند زمن قدره λ . وبالعودة إلى المعادلة (57 - 2) والتعويض عن $t = \lambda$ نجد :

$$i_{\lambda} = I_{max} (1 - e^{-1})$$

$$= 0.632\ I_{max} \quad \ldots\ldots (8 - 59)$$

أي أن التيار يصل إلى (٦٣,٢٪) من قيمته القصوى بعد مرور زمن يساوي الثابت الزمني للدائرة .

يتضح مما سبق أن وجود المحاثة في الدائرة يمنع الإرتفاع اللحظي في التيار حيث يعتمد معدل الإرتفاع على قيمة λ .

عند تحويل المفتاح «S» إلى الوضع (2) تصبح معادلة الدائرة هي :

$$0 = iR + L \frac{di}{dt} \quad \ldots\ldots (8 - 60)$$

وأحوال البداية هي :

$$t = 0, \ i = I_{max}$$

$$\int_{I_{max}}^{i} \frac{di}{i} = -\frac{R}{L} \int_0^t dt$$

$$\therefore i = I_{max}\ e^{-t/\lambda} \quad \ldots\ldots (8 - 61)$$

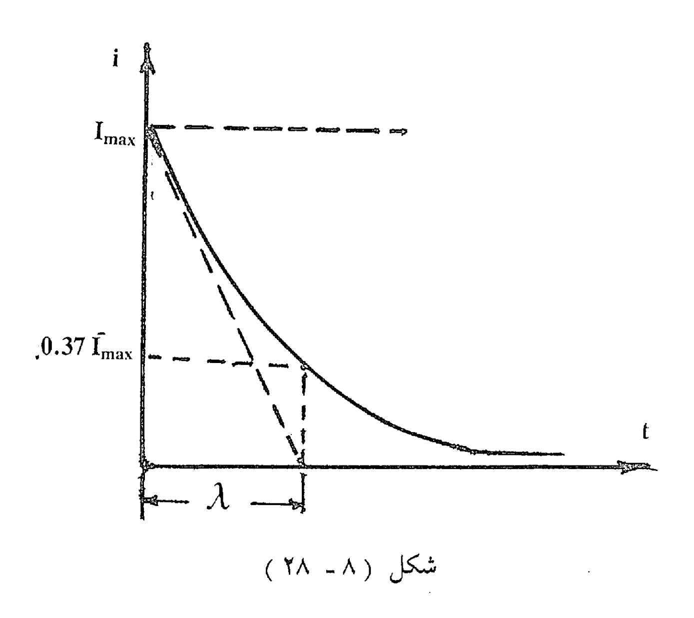
يبين الشكل (٨ ـ ٢٨) تغير التيار مع الزمن . بوضع $t = \lambda$ للحصول على قيمة التيار الحقيقية عند الثابت الزمني ، من (61 - 8) .

$$i = I_{max}\ e^{-1} = 0.37\ I_{max} \quad \ldots\ldots (8 - 62)$$

والثابت الزمني هنا هو الزمن الذي تصل فيه قيمة التيار إلى (٣٧٪) من قيمته القصوى أثناء هبوط قيمته .

نستنتج من الدراسة السابقة أن وجود المحاثة في الدائرة يعمل دائماً على تأخير تغير التيار سواء بالزيادة أو النقصان . ولا تسمح المحاثة بالتغير

المفاجىء في قيمة التيار . وهذه الخاصية شبيهة بخاصية شحن المكثف الواردة بالبند ٧ ـ ٢٩ حيث يمنع المكثف التغير المفاجىء في قيمة فرق الجهد بين لوحيه .



شكل (٨ ـ ٢٨)

ويستفيد المهندسون من خاصية التأخير الزمني في الدوائر الحثية لإمكان الحصول على التأخير الزمني المناسب لعمل المرحلات Relays أو قواطع الدائرة Circuit Breakers .

٨ ـ ٢٨ مثال :

مثال ٨ : ١٣

إذا كان الثابت الزمني لملف مرحل كهربي ٢ مللي ثانية وكان تيار التشغيل للمرحل ٠,٢٥ أمبير وتيار حفظ المرحل ٠,١ أمبير . عند وضع ٥٠ فولت ثابت القيمة (D.C.) فجأة على الملف وُجد تأخر قدره ٢ مللي ثانية قبل عمل المرحل ، أوجد :

(أ) مقاومة الملف .

(ب) محاثة الملف .

(جـ) التأخير قبل أن يفتح المرحل عند انقطاع مصدر التيار المار الملف .

المرحل هو جهاز يستعمل في الدوائر الكهربية لقفل أو فتح دائرة معينة . يبين الشكل (٨ ـ ٢٩) رسماً تخطيطياً للمرحل . عند مرور التيار في ملف المرحل وتجاوُز قيمته قيمة معينة (تسمى تيار التشغيل) يتحرك الذراع B إلى الداخل فيقفل بذلك السطح الموصل «S» التلامسين a و a′ فيقفل بذلك الدائرة . ولا يعود الذراع إلى وضعه الأول إلا إذا نقصت قيمة التيار في ملف المرحل عن قيمة معينة تسمى قيمة تيار الحفظ .

يلزم للمرحل ٢ مللي ثانية من لحظة مرور التيار حتى تصل قيمته إلى ٠,٢٥ أمبير وهي قيمة تيار التشغيل ، وحيث أن :

a) $i = I_m (1 - e^{-t/\lambda})$, $I_m = \dfrac{V}{R}$

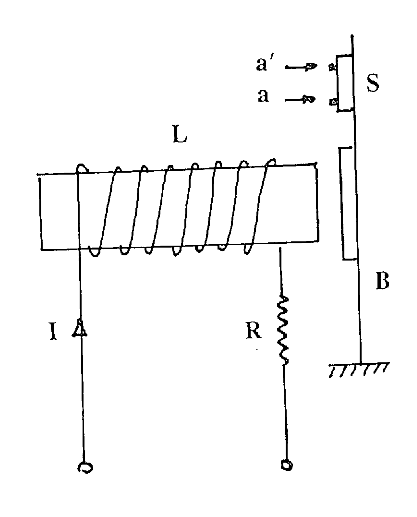
$$0.25 = \frac{50}{R}(1 - e^{-2/2})$$

$$0.25 = \frac{50}{R}\left(1 - \frac{1}{2.718}\right)$$

$$\therefore\ R = 126.1\ \Omega$$

b) $Y = \dfrac{L}{R} = 2 \times 10^{-3}$

$$L = 252.2\ \text{mH}.$$



شكل (٨ ـ ٢٩)

عند فصل دائرة المرحل يبدأ التيار في التناقص . وعند وصول قيمته إلى ١,٠ أمبير يعود المرحل إلى وضعه الأول :

c) $i = I_m e^{-t/.1}$

$$0.1 = \frac{50}{126.1} \quad e^{-t/2}$$

$$t = 2.75 \text{ m.sec.}$$



DAR EL-RATEB AL-JAMIAH

□ الادارة: مقابل جامعة بيروت العربية - بناية اسكندراني رقم (٣) الطابق ٢ تلفون ٣١٣٩٣٤ - ٣١٧١٦٩ تلكس: Rateb 43917 LE

□ المكتبة: سوفنير - مقابل جامعة بيروت العربية - بناية سعيد جعفر - تلفون ٣٠٦٥٠٥ ص.ب. ١٩٥٢٢٩ بيروت - لبنان